

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

## GONIOFOTOMETR

GONIOPHOTOMETER

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Ivor

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Peter Honec, Ph.D.

BRNO 2020

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

**Student:** Bc. Martin Ivor

**ID:** 192490

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Goniofotometr

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je vytvořit pracoviště pro měření směrových vyzařovacích charakteristik osvětlovacích těles (goniofotometr) sestávající z 2-osého manipulátoru pro natáčení osvětlovacího tělesa, luxmetru/fotočlánku a SW vybavení.

1. Seznamte se s problematikou měření charakteristik světla.
2. Navrhněte vhodné mechanicko-optické uspořádání.
3. Vytvořte pracoviště pro měření směrových vyzařovacích charakteristik.
4. Vytvořte obslužný software pro řízení celého procesu měření (řízení X/Y natožení).
5. Vytvořte obslužný SW pro vizualizaci výsledků.
6. Otestujte a vyhodnoťte.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Lighting Measurements Guide: Goniophotometer Types and Photometric Coordinates, ISBN 978-0-87995-180-1

HLAVAC V., SONKA M., BOYLE R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, ISBN 978-0495082521

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 1.6.2020

**Vedoucí práce:** Ing. Peter Honec, Ph.D.

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Diplomová práca sa zaoberá návrhom goniofotometra a užívateľského rozhrania, schopného vyhodnotiť fotometrické parametre svetelných zdrojov, a svietidiel. Úvod práce obsahuje teoretické informácie týkajúce sa fotometrie, fotometrických parametrov, svetelných zdrojov, svietidiel, ako aj teóriou merania týchto parametrov a základných celosvetovo uznávaných dátových formátov, určených k ukladaniu parametrov svetelných zdrojov. Jadro práce následne popisuje hardvér tvoriaci navrhované zariadenie a softvér, potrebný na ovládanie meracieho procesu, vizualizáciu, a uloženie nameraných výsledkov. Záver práce tvorí vyhodnotenie funkčnosti popisovaného zariadenia a merania, ktoré ním boli sprostredkované, a celkové zhrnutie dosiahnutých výsledkov.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Goniofotometer, Java, Arduino IDE, Arduino UNO, svetelné zdroje, svietidlá.

## ABSTRACT

The thesis deals with the design of a goniophotometer and the GUI (Graphical User Interface), capable of evaluating the photometric parameters of light sources and luminaires. The introduction contains theoretical information about photometry, photometric parameters, light sources, lamps, as well as the theory of measuring these parameters, and basic globally used data formats, designed to store the parameters of light sources. The core of this thesis, then describes the hardware, that makes up the proposed device, and the software needed to control the measurement process, visualization and storing the results. The conclusion is an evaluation of the functionality of the described device, and the measurements that were mediated by it, and an overall summary of the results achieved.

## KEYWORDS

Goniophotometer, Java, Arduino IDE, Arduino UNO, light sources, luminaires.

IVOR, Martin. *Goniofotometr*. Brno, 2020, 103 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedúci práce: Ing. Peter Honec, Ph.D



## VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Goniofotometr“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval Ing. Petrovi Honecovi, Ph.D. za odborné vedenie, konzultácie, materiálnu pomoc, ako aj za cenné rady, ktoré mi boli prospešné v priebehu tvorby tejto práce.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Svetlo a videnie</b>	<b>14</b>
1.1 Videnie a zrakový orgán . . . . .	14
1.2 Spektrálna citlivosť oka . . . . .	15
1.3 Fotopické videnie . . . . .	15
1.4 Skotopické videnie . . . . .	16
<b>2 Fotometria a fotometrické veličiny</b>	<b>17</b>
2.1 Svetelný tok . . . . .	17
2.2 Svietivosť . . . . .	18
2.2.1 Grafické znázornenie svietivosti zdroja žiarenia . . . . .	19
2.3 Intenzita osvetlenia . . . . .	20
2.4 Svetlenie . . . . .	20
2.5 Jas . . . . .	21
2.6 Osvit . . . . .	21
2.7 Pojmy užívané vo fotometrii . . . . .	21
2.7.1 Bodový zdroj svetla . . . . .	22
2.7.2 Plošný zdroj svetla . . . . .	22
2.7.3 Priestorový uhol . . . . .	22
<b>3 Svetelné zdroje a ich vlastnosti</b>	<b>24</b>
3.1 Vlastnosti a parametre svetelných zdrojov . . . . .	24
3.1.1 Menovité technické parametre svetelných zdrojov . . . . .	24
3.1.2 Menovité prevádzkové parametre svetelných zdrojov . . . . .	26
<b>4 Svietidlá a ich vlastnosti</b>	<b>27</b>
4.1 Triedenie svietidiel . . . . .	27
4.2 Svetelné charakteristiky svietidiel . . . . .	28
<b>5 Meranie svetelnotechnických veličín vo fotometrii</b>	<b>31</b>
5.1 Vizuálna fotometria . . . . .	31
5.2 Fyzikálna fotometria . . . . .	31
5.2.1 Meranie svietivosti . . . . .	32
5.2.2 Meranie osvetlenosti . . . . .	33
5.2.3 Meranie svetelného toku . . . . .	34
5.2.4 Meranie jasu . . . . .	39
5.3 Chyby a neistoty merania . . . . .	40

5.3.1	Chyby a neistoty merania - Goniofotometer . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Dátové formáty popisujúce svietidlá a ich svetelnotechnické parametre</b>	<b>46</b>
6.1	Dátový formát IES . . . . .	46
6.1.1	Dátový formát EULUMDAT . . . . .	47
<b>7</b>	<b>Hardvér zariadenia</b>	<b>50</b>
7.1	Arduino . . . . .	50
7.1.1	Arduino UNO . . . . .	50
7.1.2	Raspberry Pi . . . . .	51
7.1.3	Výber zariadenia . . . . .	52
7.2	Fotometrický senzor . . . . .	52
7.2.1	Výber fotosenzora . . . . .	54
7.2.2	Senzor TSL2561 . . . . .	55
7.2.3	Zbernica $I^2C$ . . . . .	56
7.3	Motor Nema . . . . .	57
7.4	M542 motor driver . . . . .	59
7.5	Infračervené optické senzory . . . . .	61
<b>8</b>	<b>Softvér zariadenia</b>	<b>62</b>
8.1	Arduino IDE - vývojový softvér . . . . .	62
8.2	Program určený pre Arduino UNO . . . . .	63
8.3	Rozbor kódu používateľského rozhrania . . . . .	67
8.3.1	Programovací jazyk Java . . . . .	67
8.4	Štruktúra programu . . . . .	68
8.4.1	Pakage CalculationAndLampsSets . . . . .	69
8.4.2	Pakage CommunicationAndSaving . . . . .	70
8.4.3	Pakage <b>measurementThread</b> . . . . .	71
8.4.4	Pakage <b>Windows</b> . . . . .	72
<b>9</b>	<b>Používateľské rozhranie Goniofotometra</b>	<b>76</b>
9.1	Funkcionality používateľského rozhrania . . . . .	76
9.1.1	Okno Results Graphs . . . . .	78
9.1.2	Okno Results Table . . . . .	79
<b>10</b>	<b>Meranie a vizualizácia</b>	<b>80</b>
10.1	Vizualizácia kriviek svietivosti . . . . .	80
10.2	Meranie svetelného toku $\Phi$ . . . . .	87
10.3	Zhrnutie merania . . . . .	88

<b>Závěr</b>	<b>89</b>
<b>Literatúra</b>	<b>90</b>
<b>Zoznam príloh</b>	<b>93</b>
<b>A Vývojový diagram programu Arduino Uno</b>	<b>94</b>
<b>B Schéma zapojenia goniofotometra</b>	<b>95</b>
<b>C Fotografia zapojenia goniofotometra</b>	<b>96</b>
<b>D Napájací zdroj</b>	<b>97</b>
D.1 Pohľad zhora . . . . .	97
D.2 Zapojenie svoriek . . . . .	97
<b>E Zapojenie senzora TSL2561</b>	<b>98</b>
<b>F Fotky goniofotometra</b>	<b>99</b>
<b>G Obsah priloženého CD</b>	<b>103</b>

# Zoznam obrázkov

1.1	Znázornenie svetelného spektra žiarenia[4]	14
1.2	Spektrálna citlivosť oka normálneho fotometrického pozorovateľa pri fotopickom a skotopickom videní[3]	15
2.1	Znázornenie priestorového uhla elementu plochy umiestnený vľavo[2] a grafické znázornenie priestorového uhla vpravo[1]	23
4.1	Piktogramy svietidiel rozdelených podľa smerovania svetelného toku, zľava priame, prevažne priame, zmiešané, prevažne nepriame, nepriame[8]	29
4.2	Rezy plochou svietivosti v rôznych fotometrických rovinách[8]	29
4.3	Grafické znázornenie parametra uhla clonenia[8]	30
5.1	Digitálny luxmeter typu PU 550 Metra Blansko[2]	33
5.2	Náčrt konštrukcie guľového integrátora[2]	35
5.3	Grafické znázornenie určenia veľkosti elementárneho priestorového uhla $d\Omega_{\gamma\theta}$ na povrchu jednotkovej gule[5]	38
6.1	Ukážka súboru vo formáte IES[13]	46
7.1	Arduino Uno[16]	51
7.2	<b>TSL2561</b> - fotosenzor použitý na zachytenie hodnôt intenzity osvetlenia svetelného zdroja[19]	56
7.3	Sekvencia prenosu dát: S - start bit, P - stop bit, $B_N$ - dátové bity[20]	57
7.4	Nema 34: motor použitý pri stavbe goniofotometra[22]	58
7.5	M542 motor driver potrebný na napájanie, ako aj ovládanie krokových motorov[23]	59
7.6	Typické zapojenie M542 s mikrokontrolerom[23]	60
7.7	Znázornenie rozloženia vstupov a prepínačov M542[23]	60
7.8	RobotDyn Optocoupler: infračervený senzor použitý v procese nastavenia počiatočnej polohy motorov[24]	61
8.1	Okno integrovaného vývojového prostredia (Arduino IDE)	63
8.2	Diagram zobrazujúci všetky premenné a funkcie, ktoré patria triede <i>MOTOR</i> .	64
8.3	Funkcia <i>setup()</i> inicializujúca komunikáciu a senzor.	65
8.4	Funkcia <i>void loop()</i> , výber príslušného stavu zariadenia v závislosti na príkaze z používateľského rozhrania.	65
8.5	Zadefinovanie základných stavov a konštánt	66
8.6	Štruktúra (balíčky, triedy) používateľského rozhrania	68
8.7	Vzájomné prepojenie tried v objektovom modeli.	69
8.8	Diagram zobrazujúci funkcie a vnútorné triedy patriace triede Window.	73
9.1	Používateľské rozhranie Goniofotometra bezprostredne po zapnutí	76

9.2	Možnosť ukladania je sprostredkovaná vpisovaním údajov do konkrétnych textových polí, a následnou aplikáciou tlačidla Save. . . . .	77
9.3	Záložky používateľského rozhrania. . . . .	78
9.4	Informatívne textové pole a tlačidlá zobrazujúce výsledky merania. .	78
9.5	Okno Results Graphs umožňujúce výber jednotlivých C rovin, ktoré je možné vizualizovať. . . . .	79
9.6	Okno Results Table umožňujúce zobrazenie nameraných hodnôt svietivosti formou tabuľky. . . . .	79
10.1	Svetelný zdroj Corepro LEDspot 4.6-50W GU10 827 36D, použitý pri testovaní goniofotometra[26] . . . . .	81
10.2	Znázornenie krivky svietivosti vo fotometrických rovinách C0-C180 .	82
10.3	Znázornenie krivky svietivosti vo fotometrických rovinách C90-C270 .	82
10.4	Znázornenie kriviek svietivosti C0-C180 a C90-C270 poskytnutých výrobcom . . . . .	83
10.5	Znázornenie kriviek svietivosti C0-C180 a C90-C270 nameraných zostrojeným goniofotometrom . . . . .	83
10.6	Svetelný zdroj LED Classic MR16 8W GU10, použitý pri testovaní goniofotometra[27] . . . . .	84
10.7	Znázornenie krivky svietivosti vo fotometrických rovinách C0-C180 .	85
10.8	Znázornenie krivky svietivosti vo fotometrických rovinách C90-C270 .	85
10.9	Znázornenie kriviek svietivosti C0-C180 a C90-C270, poskytnutých výrobcom . . . . .	86
10.10	Znázornenie kriviek svietivosti C0-C180 a C90-C270, nameraných zostrojeným goniofotometrom . . . . .	86
10.11	Svetelné zdroje použité pri testovaní goniofotometra. Zlava Philips Corepro LEDspot, Philips Corepro Lustre, Philips GENIE, EMOS LED Classic. . . . .	87

# Zoznam tabuliek

4.1	Delenie svetelných zdrojov, v závislosti na smerovaní svetelno toku v priestore[8] . . . . .	28
5.1	Hodnoty koeficientov používaných pre stanovenie neistoty merania[1] . . . . .	42
6.1	Štruktúra dátového formátu Eulumdat[14] . . . . .	47
6.2	Zmena parametrov $M_{c1}$ a $M_{c2}$ v závislosti od symetrie svetidla. . . . .	49
7.1	Porovnanie vybraných parametrov Arduina vs. Raspberry Pi[17] . . . . .	52
7.2	Prehľad parametrov vzorky svetelných senzorov . . . . .	55
7.3	Parametre motora Nema 34[22] . . . . .	58
10.1	Prehľad parametrov svetelného zdroja Philips Corepro LEDspot[26] . . . . .	81
10.2	Prehľad parametrov svetelného zdroja EMOS LED Classic[27] . . . . .	84
10.3	Prehľad hodnôt svetelného toku a percentuálnych rozdielov týchto tokov, uvedených testovaných svetelných zdrojov. . . . .	87



# Úvod

Človek získava informácie, ktoré sú kľúčové pre jeho prežitie, z vonkajšieho prostredia prostredníctvom zmyslových orgánov a receptorov. Majoritnú väčšinu informácií, o okolitom prostredí, získava prevažne prostredníctvom zraku. Predpokladá sa, že celkové množstvo informácií zachytených zrakovým systémom, tvorí spolu až 90% všetkých informácií, ktoré sú prijaté z vonkajšieho prostredia.[1]

Svetelné podmienky okolitého prostredia, prirodzene, vplývajú na psychické a fyziologické procesy odohrávajúce sa v ľudskom tele, a tým vo výraznej miere ovplyvňujú zdravie ľudí. Tvorí tzv. svetelný ekosystém[2], v ktorom sa ľudia pohybujú v prípade absencie prirodzeného zdroja svetla, akým je napríklad Slnko.

Z uvedených dôvodov sa snažíme prispôbiť prostredie, v ktorom žijeme, tak aby sme sa čo najviac priblížili optimálnym svetelným podmienkam, ktoré sú špecifikované v technických normách prijatých legislatívou danej krajiny.

Na to, aby sme mohli takéto podmienky simulovať umelým osvetlením, musíme vedieť určiť jednotlivé svetelné parametre svetelných zdrojov, ktorými nahrádzame zdroje prirodzené.

Parametre svetelných zdrojov a svietidiel sa určujú rôznymi metódami. Tieto metódy, na základe zamerania, rozdeľujeme na fotometrické a rádiometrické. Fotometrické merania a veličiny zohľadňujú spektrálnu citlivosť ľudského oka, a sprostredkujú relatívne fotometrické hodnoty daných parametrov svetelných zdrojov, v oblasti viditeľného žiarenia, zatiaľ čo rádiometrické merania sa zameriavajú na množstvo celkovej vyžiarenej energie, ktorú zdroj emituje, a sprostredkujú objektívne hodnoty veličín, a parametrov, v oblasti celého vyžarovacieho spektra, v ktorom sa svetlo vyžarované svetelným zdrojom nachádza. Medzi veličinami fotometrickými a rádiometrickými existujú veľmi úzke vzťahy[2].

Jedným z najpodstatnejších parametrov svetelného zdroja, je jeho schopnosť emitovať svetlo do okolitého priestoru. K tomu, aby sme mohli opísať túto vlastnosť, je nutné stanoviť tzv. priestorovú charakteristiku vyžarovania svetelného zdroja, prostredníctvom zaznamenania tzv. kriviek svietivosti. Uvedené krivky sa určujú prostredníctvom špeciálneho prístroja, ktorý sa volá goniofotometer. Goniofotometer je laboratórne zariadenie, ktoré prostredníctvom manipulácie s polohou svietidla, či fotometrického senzora, meria priestorové rozloženie svietivosti skúmaného zdroja svetla, na základe čoho nám poskytuje povedomie o vyžarovacích vlastnostiach meraného zdroja svetla.

V Českej republike je evidovaných jedenásť akreditovaných laboratórií, s certifikátom od Českého metrologického inštitútu (ČMI), ktoré dokážu merať svetelné charakteristiky svetelných zdrojov. Typická cena goniofotometra, ktorý je bežnou súčasťou vybavenia takýchto laboratórií, je prirodzene závislá od konštrukcie, a od

senzorického vybavenia konkrétneho zariadenia, avšak môže sa vyšplhať až na hranicu niekoľkých miliónov korún. Cieľom predloženej diplomovej práce je vytvoriť orientačný goniofotometer, ktorý musí byť jednoduchý, zároveň nenáročný na obsluhu, cenovo dostupný, a schopný vyhodnotiť orientačné dáta fotometrických charakteristík, hlavne pre účely pretypovania svetelných zdrojov. Kým sa však pustíme do programovania, je nutné objasniť základné pojmy a vzťahy, ktoré sú spojené s teóriou merania svetelných parametrov svetelných zdrojov, a svietidiel.

Diplomová práce je z dôvodu prehľadnosti, ako aj s ohľadom na zadanie práce, členená do niekoľkých častí. Prvá časť práce sa zameriava na objasnenie základných veličín, poznatkov, z odboru fotometrie, s ktorými sa môžeme stretnúť v procese vyhodnocovania parametrov svetla, svetelných zdrojov a svietidiel.

Druhá časť práce je vyplnená popisom základných metód a postupov, ktoré sa používajú pri určovaní parametrov svetelných zdrojov, parametrami svetelných zdrojov, a svietidiel, predstavením, a popisom goniofotometra, ako aj teórie, ktorá sa týka spôsobu merania kriviek svietivosti, osvetlenia, a všeobecne používaných medzinárodných dátových formátov, určených na uloženie svetelných výpočtov, a hodnôt.

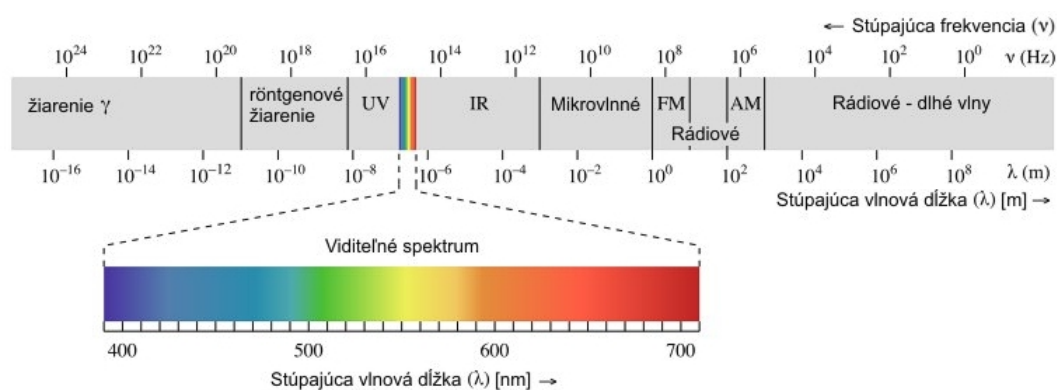
Tretiu časť následne tvorí praktická zložka, v ktorej je opísaný hardvér zariadenia, softvér spolu s grafmi, objasňujúcimi fungovanie jednotlivých programov.

Záverečnú štvrtú časť tvorí časť testovacia, v ktorej prebehlo testovanie skonštruovaného prístroja, na vybraných svetelných zdrojoch.

# 1 Svetlo a videnie

Svetelné zdroje a svietidlá sú zariadenia, ktorých primárnym účelom je tvoriť, a emitovať svetlo do okolitého priestoru. Z uvedeného faktu je preto prirodzené venovať pár viet tomu, čo to vlastne svetlo je. Svetlo predstavuje formu radiácie, ktorá sa šíri priestorom a vyznačuje sa prenosom energie v podobe elektromagnetického žiarenia, či hmotných častíc, ktoré nazývame fotóny[2].

Svetlo, emitované zdrojom žiarenia, je možné rozdeliť na priebehy, ktoré sa od seba odlišujú svojou vlnovou dĺžkou  $\lambda$ . Svetelné žiarenie môžeme následne rozdeliť, v závislosti od uvedenej vlnovej dĺžky, na jednotlivé druhy žiarenia viditeľné na obr.1.1. Ak však toto delenie zjednodušíme, pre účel tejto práce, potom môžeme povedať, že žiarenie spojitého spektra môžeme členiť na žiarenie viditeľné a na žiarenie neviditeľné. Nás zaujíma práve žiarenie viditeľné, konkrétne také, ktoré generujú svetelné zdroje a svietidlá. K viditeľnému žiareniu zaraďujeme žiarenie, ktoré je schopné vyvolať zrakový vnem[2]. K uvedenému žiareniu pripadá žiarenie, v rozmedzí vlnových dĺžok 360 nm až 780 nm[3].



Obr. 1.1: Znázornenie svetelného spektra žiarenia[4]

## 1.1 Videnie a zrakový orgán

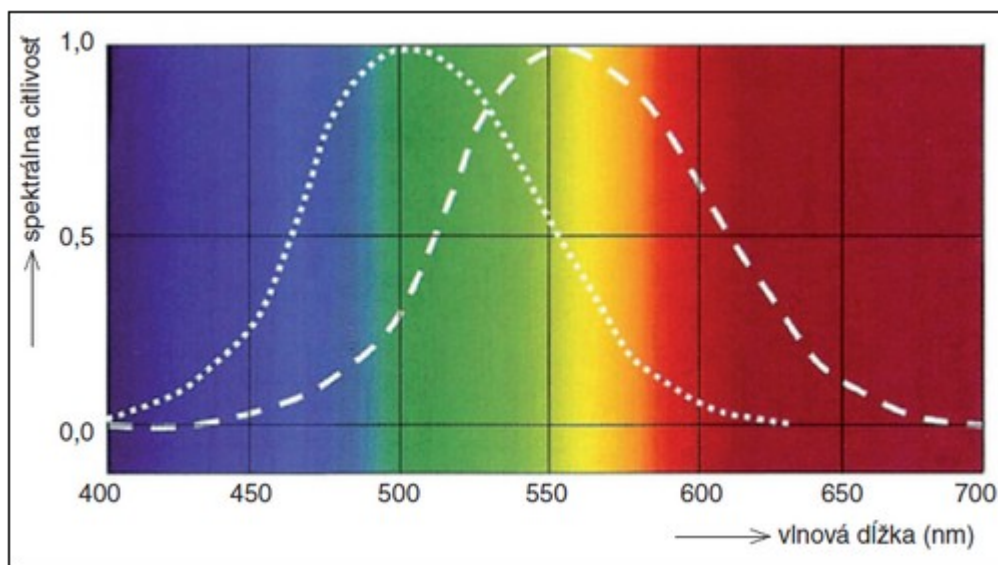
Zrakový orgán spolu s pridruženými systémami a súčastami, tvorí zložitý anatomický komplex, určený v prvom rade na príjem informácií z vonkajšieho prostredia[1].

V procese videnia dochádza k zachytávaniu, a následnému spracovaniu svetelného podnetu, k jeho transformácii na nervový vzruch, a následnému prenosu prostredníctvom optického nervu do centra zraku umiestneného v mozgu, kde sa následne tento signál interpretuje.

Ak sa chceme zaoberať problematikou návrhu osvetľovacích sústav, musíme aspoň čiastočne poznať procesy a závislosti, ktoré sa zúčastňujú na procese videnia[2].

## 1.2 Spektrálna citlivosť oka

Zrakový orgán človeka nie je rovnako citlivý na dopadajúce žiarenie rôznych vlnových dĺžok. Najväčšiu hodnotu citlivosti dosahuje ľudské oko v prípade, že sa jedná o fotopické videnie pri dopadajúcom žiarení o hodnote 555 nm[2]. Táto hodnota však nie je presná, a líši sa pri každom pozorovateli. Spektrálna citlivosť je tiež závislá na množstve prítomného jas. Jej hodnota sa vzhľadom na množstvo jas dynamicky mení, čoho dôkazom môže byť jej rozdielny priebeh pri skotopickom a fotopickom videní. Priebeh spektrálnej citlivosti oka znázorňuje krivka, ktorá je zobrazená na priloženej ilustrácii 1.2[1].



Obr. 1.2: Spektrálna citlivosť oka normálneho fotometrického pozorovateľa pri fotopickom a skotopickom videní[3]

Pamätajúc na rozdielnu spektrálnu citlivosť rozličných pozorovateľov, ako aj na závislosť spektrálnej citlivosti pozorovateľa, optického senzora, na type videnia (skotopické, fotopické) pri rozdielnej úrovni jas, prijala Medzinárodná organizácia pre osvetľovanie (ďalej len CIE) dohodu, ktorá stanovuje hodnotu spektrálnej citlivosti tzv. normálneho fotometrického pozorovateľa, s cieľom zachovať jednotnosť svetelných výpočtov. Hodnoty spektrálnej citlivosti pozorovateľa pri fotopickom videní prijala aj česká legislatíva v norme ČSN IEC 50(845)[2].

## 1.3 Fotopické videnie

Fotopické videnie predstavuje typ videnia, ktorý sa vyskytuje v každodennom živote. Uplatňuje sa v prípade, že veľkosť úrovne jas dosahuje minimálne hodnoty

$3cd.m^{-2}$  , čo je medzná hodnota pre proces adaptácie ľudského oka na tento druh denného videnia. Zároveň je fotopické videnie uprednostňované pri zhotovovaní svetlotechnických výpočtov. Fotopické videnie sprostredkujú svetlocitlivé bunky oka lokalizované na sietnici tzv. čapíky[1].

## 1.4 Skotopické videnie

Skotopické videnie, tiež známe pod pojmom nočné videnie, predstavuje druhý krajný prípad videnia. Tento typ videnie sprostredkujú svetlocitlivé receptory nachádzajúce sa v oku tzv. tyčinky. Podobne, ako to bolo pri fotopickom type videnia aj tento typ je spojený s určitými hodnotami jasu, ktoré dosahujú úrovne niekoľkých tisícín, až stotín  $cd.m^{-2}$ .

Nízka úroveň jasu spôsobuje zmenu krivky spektrálnej citlivosti oka, tá sa posúva doľava, k žiareniu s nižšou vlnovou dĺžkou, a oko je v tomto prípade najviac citlivé na žiarenie s hodnotou 507 nm. Pri skotopickom type videnia sa výrazne stráca schopnosť oka rozoznávať jednotlivé farby[1].

## 2 Fotometria a fotometrické veličiny

Fotometria je vedná disciplína, ktorá skúma a vyhodnocuje parametre, a vlastnosti, svetelných zdrojov, svietidiel, v závislosti na špecifických vlastnostiach ľudského zraku. Oko, ako senzor viditeľného žiarenia nevníma elektromagnetické žiarenie, v oblasti viditeľného spektra, s rôznymi vlnovými dĺžkami kvalitatívne rovnako, a to musíme zohľadňovať pri procese vyhodnocovania parametrov svetelných zdrojov[1]. V závislosti od spektrálnej citlivosti ľudského pozorovateľa, boli zavedené tzv. fotometrické veličiny, ktoré vychádzajú z radiometrických veličín žiarenia. Spomínané fotometrické veličiny rešpektujú spektrálnu citlivosť normálneho fotometrického pozorovateľa, a tým pádom sa orientujú len na žiarenie obsiahnuté vo viditeľnej časti svetelného spektra. Radíme sem veličiny nasledovné[2]:

- Svetelný tok,
- Svietivosť,
- Intenzita osvetlenia,
- Svetlenie,
- Jas,
- Osvit.

### 2.1 Svetelný tok

Svetelný tok je technická fotometrická veličina, ktorá je analogická k žiarivému toku[1], pričom v závislosti na spektrálnej citlivosti pozorovateľa vyjadruje schopnosť žiarivého toku vyvolať zrakový vnem. Jednotkou svetelného toku je lumen [lm], a v prípade monochromatického žiarenia s určitou vlnovou dĺžkou  $\lambda$ , je možné tento tok určiť nasledujúcim vzťahom[2]:

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) * \Phi_e(\lambda)[lm; lm * W^{-1}, -, W] \quad (2.1)$$

kde:

$K(\lambda)$  odpovedá svetelnému účinku monochromatického žiarenia, ktorý sa väčšinou udáva v podobe súčinu pomernej svetelnej účinnosti  $V(\lambda)$  a maximálnej hodnoty spektrálneho priebehu  $K_m$ .

$$\Phi(\lambda) = 683 * V(\lambda) * \Phi_e(\lambda)[lm; lm * W^{-1}, -, W] \quad (2.2)$$

Veličina pomernej svetelnej účinnosti žiarenia  $V(\lambda)$ , obyčajne kopíruje priebeh pomernej spektrálnej citlivosti normálneho fotometrického pozorovateľa v procese fotopického videnia[2].

Hodnota  $K_m$ , bola vyčíslená komisiou CIE na  $683 \text{ lm} * W^{-1}$ . Maximálna svetelná účinnosť predstavuje konštantu, ktorá vymedzuje vzťah medzi svetelným tokom a žiarivým tokom[2].

Uvedenú skutočnosť je najlepšie demonštrovať na príklade: V prípade nutnosti porovnania veľkosti svetelného toku dvoch svetelných zdrojov, je nutné tento tok pre jednotlivé zdroje stanoviť. Majme svetelný zdroj, ktorý emituje do svojho okolia žiarenie s vlnovou dĺžkou  $\lambda = 650 \text{ nm}$  o hodnote žiarivého toku  $5W$ . V prípade tohto zdroja je možné prostredníctvom vyhľadania hodnoty pomernej svetelnej účinnosti žiarenia  $V(\lambda)$ , ktorá je rovná  $0,107$ , vyjadriť svetelný tok mysleného zdroja svetla prostredníctvom rovnice 2.3:

$$\Phi(\lambda) = 683 * 0,107 * 5 = 365.405[\text{lm}] \quad (2.3)$$

V prípade zrovnávacieho zdroja s parametrami  $\Phi_e(\lambda) = 5W$ ,  $\lambda = 550 \text{ nm}$ , je postup rovnaký. Vyhľadáme si z tabuľky hodnotu svetelnej účinnosti a predchádzajúci postup zopakujeme:

$$\Phi(\lambda) = 683 * 0,995 * 5 = 3397.925[\text{lm}] \quad (2.4)$$

Z uvedeného príkladu jasne vyplýva popísaná teoretická skutočnosť závislosti hodnoty svetelného toku od pomernej svetelnej účinnosti žiarenia  $V(\lambda)$ , a teda aj od spektrálnej citlivosti normálneho fotometrického pozorovateľa[2].

Všetky doteraz uvedené vzťahy sa zameriavajú primárne na žiarenie monochromatické *tz.* žiarenie s jednou vlnovou dĺžkou  $\lambda$ .

V prípade žiarenia so spektrom vlnových dĺžok  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ , je možné celkový svetelný tok  $\Phi$  vyjadriť sumou jednotlivých svetelných tokov  $\Phi_i$ , prítomných monochromatických žiarení. V tomto prípade sa spektrum vlnových dĺžok rozčlení na  $n$  úsekov  $\Delta\lambda$ . Z týchto úsekov sa následne určí stredná hodnota žiarivého toku  $\Phi_e(\lambda_i)$ , a hodnota pomernej svetelnej účinnosti  $V(\lambda)$  odpovedajúca jednotlivým hodnotám vlnových dĺžok príslušných žiarivých tokov. Uvedený postup vyjadruje nasledujúci matematický výraz[1]:

$$\Phi = K_m \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\Phi_e(\lambda_i)}{\Delta\lambda_i} * V(\lambda_i) * \Delta\lambda_i[\text{lm}; \text{lm} * W^{-1}, W * m^{-1}, -, m] \quad (2.5)$$

## 2.2 Svietivosť

Svietivosť predstavuje kľúčovú fotometrickú veličinu, ktorá je pravdepodobne najčastejšie meraná v laboratóriu svetelnej techniky. V praxi vyjadruje priestorové rozloženie svetelného toku  $\Phi$  v danom priestore. Zodpovedá veľkosti vyžiareného svetelného toku obsiahnutému v určitom vymedzenom priestore, ktorý je definovaný

priestorovým uhlom. Z uvedenej definície je teda možné vyjadriť svietivosť ako[1]:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} [cd; lm, sr] \quad (2.6)$$

kde:

$d\Phi$  je hodnota veľkosti svetelného toku svietidla,

$d\Omega$  priestorový uhol, ktorý vymedzuje priestor, do ktorého je spomínaný svetelný tok svietidla smerovaný.

Jednotkou svietivosti je jedna kandela (cd), ktorá bola prijatá v roku 1979, a stala sa súčasťou tabuľky základných fyzikálnych veličín sústavy SI. Etalón jednej kandely predstavuje svietivosť absolútne čierneho telesa v kolmom smere na povrch o rozmere  $\frac{1}{6} * 10^{-5} m^2$ , pri teplote tuhnutia platiny a tlaku 101 325 Pa[5]. Rovnako môžeme kandelu popísať, ako svietivosť zdroja monochromatického žiarenia s frekvenciou  $540 * 10^{12} Hz$  a žiarivosťou  $\frac{1}{683} W * sr^{-1}$  v určitom smere[1].

Platí pravidlo, že svietivosť určujeme len pre bodové zdroje svetla, poprípade bodové svietidlá[1]. V prípade bodových zdrojov, svietidiel, predpokladáme umiestnenie aktívnej vyžarovacej plochy svietidla do vrchola priestorového uhla, teda do bodu, ktorý nazývame svetelným stredom zdroja[2].

## 2.2.1 Grafické znázornenie svietivosti zdroja žiarenia

Svietivosť môžeme znázorniť, ako orientované úsečky, vektory, ktoré smerujú od fotometrického stredu bodového zdroja svetla, prípadne bodu, v ktorom si môžeme predstaviť sústredný zdroj svetla[5]. V prípade, že zistíme všetky tieto vektory svietivosti, a spojíme ich na povrchu imaginárnej gule, ktorej stred sa nachádza vo fotometrickom strede, dostaneme fotometrickú plochu svietivosti. Takto získaná plocha svietivosti sa obyčajne v praxi pri výpočtoch osvetlenia nepoužíva, a to v zásade kvôli svojej zložitosti. Namiesto plochy svietivosti sa do úvahy berú rezy touto plochou. Takéto rezy plochou svietivosti sa nazývajú čiary, či krivky svietivosti[2].

Výrobcovia pôsobiaci v odbore osvetľovacích sústav často udávajú krivky svietivosti v dokumentácii priloženej ku konkrétnemu zdroju svetla, prípadne ku konkrétnemu svietidlu.

Krivky svietivosti sa obyčajne udávajú v rovinách vybraných z troch typov zväzkov rôznobežných rovín, ktorých priesečník prechádza svetelným stredom svietidla. Na základe doporučenia CIE sa tieto roviny rozdeľujú na fotometrické roviny  $C - \gamma$ ,  $B - \beta$ , a v praxi už málo používanú rovinu  $A - \alpha$ [1].



## 2.3 Intenzita osvetlenia

Intenzita osvetlenia, tiež známa pod pojmom osvetlenosť, patrí medzi základné veličiny, ktoré sledujeme v spojení so svetelnou technikou. Jednotkou intenzity osvetlenia je lux (lx). Udáva intenzitu časti svetelného toku, ktorý dopadá na osvetľovaný element plochy. Popisuje teda, ako kvalitne je osvetlená určitá plocha, teda aký veľký svetelný tok  $\Phi$  dopadá na jeden meter štvorcový myslenej plochy[6]. Intenzitu osvetlenia je možné určiť nasledujúcim vzťahom:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} [lx; lm, m^2] \quad (2.7)$$

kde:

$d\Phi$  je veľkosť elementu svetelného toku (lm), ktorý dopadá na určitú elementárnu plochu,

$dA$  je spomínaná plocha, ktorá je osvetľovaná svetelným žiarením.

Hodnota intenzity osvetlenia je závislá od vzdialenosti svetelného zdroja pričom platí, že veľkosť intenzity klesá s druhou mocninou vzdialenosti. Rovnako pre intenzitu osvetlenia platí tzv. kosínusová veta, ktorá vyjadruje hodnotu osvetlenia vzhľadom k uhlu  $\beta$ , ktorý zvierá lúč svetla s normálou osvetľovanej plochy.

$$E = \frac{I_\gamma \cos \beta}{l^2} [lx; cd, m, -] \quad (2.8)$$

kde:

$l$  je vzdialenosť od zdroja svetla,

$I_\gamma$  je svietivosť s určitým uhlom  $\gamma$ ,

$\beta$  je uhol medzi svetelným paprskom a normálou osvetlenej plochy.

Možno predpokladať, že intenzita osvetlenia je najväčšia za podmienky, že zvierať uhol  $\beta$  má nulovú hodnotu. V tomto, hypotetickom, prípade je hodnota osvetlenia závislá len od vzdialenosti zdroja svetla a samotnej veľkosti svietivosti  $I$ [1].

## 2.4 Svetlenie

Svetlenie definujeme ako podiel hustoty svetelného toku vyžarovaného určitou plochou. V podstate svetlenie, ako fotometrická veličina vyjadruje schopnosť určitej plochy povrchu vyžarovať určité množstvo svetelného toku. Matematicky je tento vzťah možné popísať ako[2]:

$$M = \frac{d\Phi}{dA} [lm * m^{-2}; lm, m^2] \quad (2.9)$$

kde:

$d\Phi$  vyjadruje hodnotu svetelného toku,

$dA$  plochu, ktorá vyžaruje, reflektuje svetelné žiarenie.

## 2.5 Jas

Jas určujeme vzhľadom na priestorovú alebo plošnú hustotu svetelného toku. Jas rovnako patrí medzi primárne veličiny, na ktoré ľudské oko reaguje, a na ktoré sa snaží adaptovať. Základná jednotka vyjadrujúca mohutnosť jasu sa nazýva kandela na meter štvorcový  $cd.m^{-2}$ . Zdrojom jasu nemusí byť len zdroj svetla vyžarujúci žiarenie, ale v podstate akákoľvek plocha, či objekt, ktorý vďaka svojim vlastnostiam dokáže svetlo odrážať do okolitého priestoru. Jas zväzku svetelných lúčov môžeme matematicky vyjadriť vzťahom[2]:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA} [cd * m^{-2}; lm, sr, m^2] \quad (2.10)$$

kde:

$d\Omega$  značí jednotkový priestorový uhol

$dA$  je plocha, ktorá je kolmá na osu vyžiareného/odrazeného svetelného lúča.

## 2.6 Osvit

Ja fyzikálna veličina, ktorú môžeme vyjadriť, ako súčin svetelnej intenzity, teda osvetlenosti, za určitý stanovený čas, alebo ako podiel svetelného množstva v závislosti na veľkosti osvetlenej plochy. Matematický vzťah popisujúci osvit je nasledovný[2]:

$$H = \frac{dQ}{dA} = \int_0^t E dt \quad (2.11)$$

V tomto prípade predstavuje veličina  $dQ$  svetelné množstvo a  $dA$  osvetlenú plochu. Jednotkou osvitu je lux za sekundu lx.s.

## 2.7 Pojmy užívané vo fotometrii

V úvode, ale následne aj ďalej v priebehu tejto kapitoly, ktorá je zameraná na popis základných fotometrických veličín sa vyskytli pojmy, ktoré doteraz neboli vysvetlené. Keďže sa jedná o pomerne podstatné veličiny, pojmy, prípadne myšlienkové obrazy a aproximácie, je nutné ich zadefinovať v nasledujúcich podkapitolách.

### 2.7.1 Bodový zdroj svetla

Bodový zdroj svetla je pojem podobný konceptu hmotného bodu známeho z fyziky. Pod týmto pojmom si môžeme predstaviť zdroj svetla, ktorého rozmery sú zanedbateľne malé, a z toho dôvodu sa nimi pri výpočtoch nemusíme zaoberať. Bodový zdroj je však len abstraktný pojem a v reálnom svete sa takýto zdroj svetla nevyskytuje. V praxi považujeme za bodový zdroj svetla akýkoľvek zdroj, ktorý je dostatočne vzdialený od senzora, prípadne pozorovateľa. Táto doporučená vzdialenosť, pri ktorej môžeme zdroj svetla považovať za bodový je zadaná v norme ČSN EN 13032-1, a prakticky odpovedá minimálne päťnásobku rozmeru aktívnej časti svietidla, zdroja svetla[5].

### 2.7.2 Plošný zdroj svetla

O plošnom zdroji svetla hovoríme v prípade, že rozmery zdroja vzhľadom na vzdialenosť pozorovateľa nemôžu byť zanedbané, v procese určovania parametrov osvetlenia. V uvedenom prípade sa zdroj svetla člení na niekoľko menších častí, pri ktorých sa už uplatňuje teória o bodovom zdroji svetla[1].

### 2.7.3 Priestorový uhol

Priestorový uhol predstavuje veľmi podstatnú veličinu užívanú pri svetelnotechnických výpočtoch. Reprezentuje časť priestoru, ktorá je vyseknutá kuželovou plochou, ktorej základňa tvorí plochu  $A$ , na povrchu jednotkovej gule, pričom vrchol uvedeného kužela je totožný so stredom opisovanej gule. Veľkosť priestorového uhla určíme ako[2]:

$$\Omega = \frac{A}{r^2} [sr; m^2, m] \quad (2.12)$$

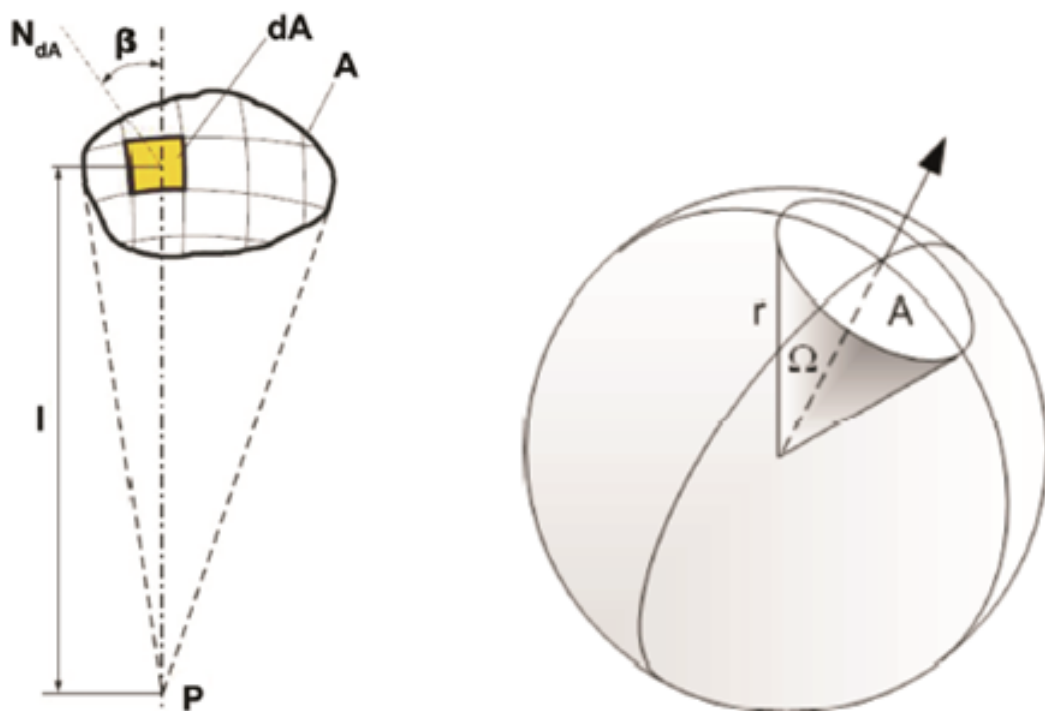
kde:

$A$  predstavuje plochu, ktorá sa nachádza na povrchu spomínanej jednotkovej gule,  $r$  je polomer jednotkovej gule.

Priestorový uhol meriame v steradiánoch (sr), pričom maximálna hodnota, ktorú môže priestorový uhol nadobudnúť je rovná  $4\pi$ . Túto hodnotu priestorový uhol nadobúda v prípade, ak sa plocha  $A$  vyfatá priestorovým uhlom rovná celému povrchu gule tzn.  $A = 4\pi r^2$ [1].

Na obr. 2.1 sa vľavo nachádza znázornenie elementu plochy  $dA$ . V prípade, že chceme určiť priestorový uhol tejto graficky znázornenej elementárnej plochy, určíme ho zo vzťahu:

$$d\Omega = \frac{dA \cdot \cos \beta}{l^2} [sr; m^2, m] \quad (2.13)$$



Obr. 2.1: Znázornenie priestorového uhla elementu plochy umiestnený vľavo[2] a grafické znázornenie priestorového uhla vpravo[1]

kde:

$d\Omega$  predstavuje element priestorového uhla,

$dA$  je elementárna plocha, ktorú môžeme pozorovať z bodu  $P$ , nachádzajúceho sa vo vzdialenosti  $l$ ,

$\beta$  predstavuje uhol medzi normálou  $N_{dA}$  a paprskom svetla, ktorý smeruje na danú plochu.

Celkový priestorový uhol  $\Omega$ , pod ktorým je zobrazená plocha  $A$  viditeľná z bodu  $P$ , je rovný súčtu jednotlivých elementárnych priestorových uhlov  $d\Omega$ , na ktoré bola táto plocha  $A$  rozdelená. Matematicky túto skutočnosť možno vyjadriť integráciou rovnice 2.13 po ploche tak, ako popisuje rovnica 2.14.

$$\Omega = \int \int_A \frac{\cos \beta}{l^2} * dA [sr; m^2, m] \quad (2.14)$$

## 3 Svetelné zdroje a ich vlastnosti

Pod pojmom svetelný zdroj si vo väčšine prípadov predstavíme technické zariadenie, ktorého primárnym účelom je emisia žiarenia v spektrálnom pásme viditeľného svetla, ktoré je možné zachytiť ľudským okom.

Takéto svetelné zdroje môžu mať rozličný dizajn a môžu sa rovnako líšiť aj v princípoch a metódach, ktorými generujú, a vyžarujú svetelné žiarenie[7].

Elementárne delíme svetelné zdroje na primárne, sekundárne, prirodzené a umelé. Prirodzené svetelné zdroje sú svetelné zdroje, ktoré generujú svetlo prirodzene, a zároveň sa nachádzajú voľne v prírode, sem zaraďujeme zdroje akým je Slnko. Umelé zdroje svetla sa naopak od tých prirodzených líšia tým, že boli špeciálne navrhnuté a skonštruované, práve za účelom emisie svetla do priestoru.

Samostatné členenie zdrojov svetla na primárne a sekundárne vychádza zo skutočnosti, aký objekt svetlo emituje. V prípade primárnych zdrojov vyžaruje svetlo samotný zdroj. V tomto konkrétnom prípade sa svetlo na jednom mieste generuje, a súčasne je aj emitované do okolitého priestoru. V prípade sekundárnych zdrojov tomu tak nie je, svetlo je síce týmito zdrojmi do priestoru vysielané, avšak to sa deje až po dopade svetla na ich povrch, a to práve z primárnych zdrojov[2].

### 3.1 Vlastnosti a parametre svetelných zdrojov

Vzhľadom na to, že existujú rozličné svetelné zdroje, výrobcovia dlhodobým pozorovaním určili základné parametre, ktoré udávajú vlastnosti určitej rady, či typu svetelných zdrojov. Takto udávané parametre sa označujú, ako menovité parametre. Menovité parametre sa samozrejme líšia od skutočných parametrov konkrétneho svetelného zdroja, avšak tento rozdiel nie je markantný a závisí od výrobného procesu, materiálov, ktoré boli použité pri výrobe svetelného zdroja. Menovité parametre rozdeľujeme na technické a prevádzkové.[2]

#### 3.1.1 Menovité technické parametre svetelných zdrojov

Menovité technické parametre sú parametre, ktoré popisujú kvalitatívne vlastnosti svetelného zdroja, prípadne svietidla, z hľadiska jeho konštrukcie. K tejto skupine parametrov zdroja radíme[2]:

- Konštrukčné parametre,
- Svetelnotechnické parametre,
- Elektrické parametre,
- Životnosť (život).

## Konštrukčné parametre svetelných zdrojov

Ako názov iste napovedá, konštrukčné parametre svetelných zdrojov vychádzajú z konštrukcie konkrétneho typu svetelného zdroja. Patria sem parametre, ako je hmotnosť, tvar, rozmery, typ elektród, vlastnosti ktoré ovplyvňujúce svetelné vlastnosti, konštrukčný typ patice a podobne[1][2].

## Svetelnotechnické parametre svetelných zdrojov

Svetelnotechnické vlastnosti svetelných zdrojov sledujú výhradne hodnoty svetelnotechnických veličín. Do tejto skupiny radíme svetelný tok, svietivosť, priestorové rozloženie jasů, spektrálne zloženie, ale aj iné parametre popisujúce kolorimetrické vlastnosti daného svetelného zdroja. Medzi kolorimetrické ukazovatele patrí teplotná chromatičnosť  $T_c$ , index podania farieb  $R_a$ [1].

## Elektrické parametre svetelných zdrojov

Elektrické parametre, týkajúce sa svetelných zdrojov, sa prakticky nelíšia od elektrických parametrov, ktoré určujeme pri akomkoľvek inom bežnom elektrickom zariadení. K týmto parametrom môžeme zaradiť príkon zdroja, napätie, druh napájacieho prúdu atď.[2].

## Životnosť (život) svetelných zdrojov

Životnosť svetelného zdroja je parametre, ktorý špecifikuje dobu počas ktorej je svetelný zdroj funkčný, respektíve dobu počas ktorej jeho parametre klesnú pod určitú hranicu[1].

Doba životnosti sa udáva väčšinou v hodinách. K životnosti svetelných zdrojov môžeme priradiť nasledujúce pojmy: fyzický život, užitočná životnosť, činiteľ starnutia, činiteľ životnosti, činiteľ funkčnej spoľahlivosti zdroja a priemerná životnosť.

Fyzický život svetelného zdroja je obdobie, počas ktorého je svetelný zdroj funkčný, a produkuje svetelné žiarenie. Počas prevádzky svetelného zdroja prebiehajú, vo vnútri zdroja, rôzne fyzikálne a chemické procesy, ktoré degradujú vlastnosti, a parametre zdroja, a to do doby, kým nedôjde k takej situácii, že daný svetelný zdroj prestane byť funkčný, prestane si plniť svoju základnú elementárnu funkciu.

Užitočná životnosť popisuje obdobie, počas ktorého produkuje svetelný zdroj svetlo s určitými predpísanými parametrami. Pásmo hodnôt, ktoré určujú užitočný životný cyklus určuje výrobca.

Činiteľ starnutia predstavuje percentuálnu hodnotu, ktorá je vyjadrená pomerom hodnôt svetelného toku zdroja, v danom okamihu, v závislosti na tzv. počiatočnom svetelnom toku v referenčných podmienkach. Rôzne druhy svetelných zdrojov sa

odlišujú v hodnote počiatočného svetelného toku, napr. pri žiarovkách sa počiatočný svetelný tok udáva po hodine svietenia, pri výbojkách sa udáva hodnota po sto hodinách svietenia.

Činiteľ funkčnej spoľahlivosti svetelného zdroja udáva podiel zdrojov, ktoré si zachovali funkčnosť po tom, ako boli za určitých referenčných podmienok testované, takým spôsobom, že boli systematicky zapínané a vypínané.

Posledným parametrom je priemerná životnosť svetelného zdroja, ktorá udáva časový interval, počas ktorého klesne činiteľ funkčnej spoľahlivosti na 50% svojej pôvodnej hodnoty[2].

### 3.1.2 Menovité prevádzkové parametre svetelných zdrojov

Radíme sem parametre, ktoré súvisia prevažne z prevádzkou konkrétneho typu svetelného zdroja. Patrí sem[2]:

- Účinnosť,
- Kompatibilita,
- Cena,
- Ekonomickosť.

#### Účinnosť

Účinnosť patrí medzi najdôležitejšie parametra svetelného zdroja. V podstate určuje aké množstvo svetelného toku je zdroj schopný vyžiariť, v závislosti na dodanej energii. Keďže väčšinu dnes používaných svetelných zdrojov radíme medzi elektrické svetelné zdroje, účinnosť vyjadruje mieru premeny elektrickej energie, ktorá svetelný zdroj napája, na svetelný tok, ktorý následne zdroj emituje do okolia[8].

$$\eta = \frac{\Phi}{P}[lm * W^{-1}; lm, W] \quad (3.1)$$

kde:

$\Phi$  je svetelný tok generovaný svetelným zdrojom,  
 $P$  je elektrický príkon.

## 4 Svietidlá a ich vlastnosti

Pri pojme svietidlo si môžeme predstaviť akúsi podpornú sústavu, ktorá podporuje, chráni, umožňuje upevniť svetelný zdroj, a v neposlednej miere je schopné radikálne ovplyvniť vyžarovacie charakteristiky svetelného zdroja alebo zdrojov, ktoré sú v tomto svietidle umiestnené. Dobre navrhnuté svietidlo dokáže v podstatne miere zvýšiť efektívnosť svetelného zdroja, či zdrojov tým, že v pozitívnom slova zmysle ovplyvní schopnosť svetelného zdroja emitovať svetelný tok do určitého priestorového uhla.

Jednotlivé časti, z ktorých je svietidlo tvorené, môžeme rozdeliť na separátne oddiely, a to v závislosti na tom, aké parametre svetelného zdroja ovplyvňujú, alebo podľa toho, za akým účelom sú použité. Tieto separátne časti členíme na konštrukčné a na svetelno činné časti. Konštrukčné časti slúžia na zachytenie, upevnenie a mechanickú ochranu zdroja svetla. Svetelno činné časti, ako je z ich názvu pomerne badateľné, slúžia na ovplyvnenie svetelnotechnických vlastností a charakteristík daného zdroja svetla[2].

Separátne parametre svietidiel sú späté s ich dizajnom, elektrickými a energetickými vlastnosťami. Cieľom predloženej práce nie je presný popis jednotlivých druhov svietidiel, ani skúmanie svietidiel s ohľadom na ich elektrické parametre, či mechanické parametre, z toho dôvodu, až na pár možných výnimiek tieto parametre nebudú popísané.

Svetelnotechnický parameter, na ktorý sa najviac orientujeme pri popise svetelného zdroja, či svietidla, je mohutnosť a priestorové rozloženie svetelného toku, ktorý zdroj vyžiari do svojho okolia[6].

### 4.1 Triedenie svietidiel

Členenie svietidiel nie je jednoduché, a je ovplyvnené v závislosti na tom, aké vybrané charakteristiky posudzujeme, tým pádom je aj značne nejednotné, a občas by sa dalo označiť za mätúce. Svietidlá napríklad rozdeľujeme podľa spôsobu použitia, účelu, dizajnu či svetelných vlastností.

Snáď najzákladnejšie delenie, ktoré môžeme zaviesť je delenie na základe oblasti a účelu použitia:

- Technické svietidlá,
- Signalizačné svietidlá,
- Dekoračné svietidlá.

Spomínané delenie je však len orientačné, hlavne kvôli nejednoznačnému vymedzeniu základných pojmov. Určité svietidlo môže spadať do kategórie technických svietidiel, a zároveň mať aj estetický charakter dekoračného svietidla[2].



V závislosti na type svietidla využívame rozličné svetenotechnické, elektrické, konštrukčné parametre, na podrobnejší opis tohto svietidla. Čo sa týka technických svietidiel sú takýmito parametrami, ktoré sú bežne dostupné v priložených materiáloch poskytnutých výrobcom parametre ako:

- Svetelný tok,
- Krivky svietivosti,
- Príkon,
- Účinnosť,
- Uhol clonenia[8].

## 4.2 Svetelné charakteristiky svietidiel

K svetelným charakteristikám svietidiel zaraďujeme parametre, ktoré súvisia hlavne s vyžarovacími schopnosťami daného svietidla. Radíme sem už spomínané parametre, ako je svetelný tok, účinnosť, svietivosť, jas, či uhol clonenia daného svietidla.

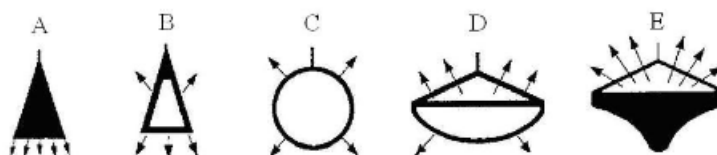
### Svetelný tok svietidla

Svetelný tok svietidla predstavuje základný, a spolu so svietivosťou, a jej priestorovým rozložením, najpodstatnejší parameter uvádzaný výrobcom daného svetelného zariadenia. Svetelný tok svietidla je tok, ktorý svietidlo vyžaruje do okolia, pričom je tvorený svetelným tokom svetelného zdroja, respektíve zdrojov, umiestnených vo vnútri daného svietidla. Je nutné podotknúť, že svetelný tok svietidla je z pravidla menší, ako svetelný tok vnútorného zdroja svetla. Tento veľkostný rozdiel je spôsobený stratovým svetelným tokom, ktorý bol pohltý pri prechode svetla svietidlom[8].

Na základe percentuálneho rozloženia svetelného toku v priestore, je možné rozdeliť svietidlá podľa tab. 4.1:

Tab. 4.1: Delenie svetelných zdrojov, v závislosti na smerovaní svetelného toku v priestore[8]

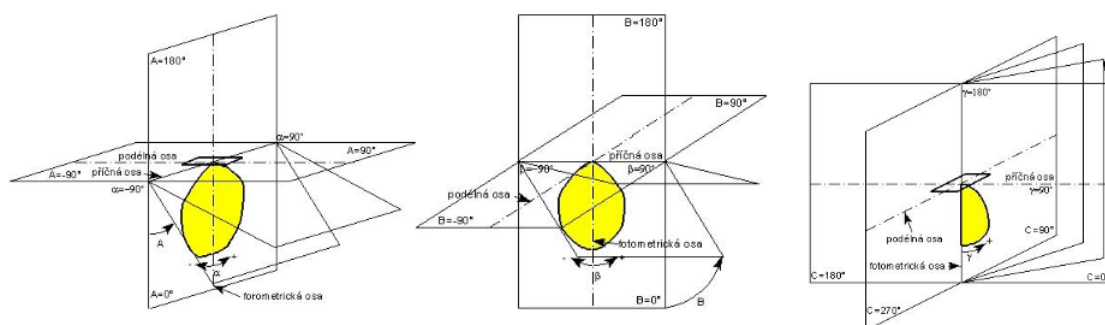
Členenie:	Tok do spodného polpriestoru [%]	Tok do horného polpriestoru [%]
Priame	90% - 100%	0% - 10%
Prevažne priame	60% - 90%	10% - 40%
Zmiešané	40% - 60%	40% - 60%
Prevažne nepriame	10% - 40%	60% - 90%
Nepriame	0% - 10%	90% - 100%



Obr. 4.1: Piktogramy svietidiel rozdelených podľa smerovania svetelného toku, zľava priame, prevažne priame, zmiešané, prevažne nepriame, nepriame[8]

### Svietivosť svietidla

Svietivosť svietidla je parameter, ktorý opisuje priestorové vyžarovacie schopnosti svietidla v závislosti na rozložení, veľkosti hodnôt svietivosti v priestore, do ktorého svietidlo vyžaruje svetlo. Svetivosť svietidla sa určuje rovnakým spôsobom, ako svietivosť svetelného zdroja, a v prípade vynesenia všetkých vektorov svietivosti vzniká plocha svietivosti svietidla. Totožne, ako v prípade svetelných zdrojov, je možné prostredníctvom goniofotometra určiť rezy touto plochou, a tak vyjadriť krivky svietivosti. Krivky svietivosti výrobcovia bežne udávajú v dokumentácii ku konkrétnemu svietidlu[8].



Obr. 4.2: Rezy plochou svietivosti v rôznych fotometrických rovinách[8]

V zásade nie je nutné udávať v dokumentácii všetky rezy plochou svietivosti. Množstvo rezov, poskytnutých v dokumentácii, sa odvíja od parametra symetrie svietidla (svetelného zdroja). Symetria predstavuje významný konštrukčný parameter, od ktorého závisí zložitosť meracieho procesu svetelných rovin, a ich následná dokumentácia v podobe všeobecne uznávaných formátov, určených pre fotometrické merania.

### Účinnosť svietidla

Účinnosť svietidla je parameter svietidla, ktorý môžeme vyjadriť ako podiel veľkostí svetelného toku, ktorý do svojho okolia svietidlo vysiela a veľkosti svetelného toku,

ktorý produkuje svetelný zdroj, či zdroje, ktoré sú konštrukčnou súčasťou uvedeného svietidla[1]. Z uvedeného môžeme teda účinnosť svietidla vyjadriť nasledovným spôsobom:

$$\eta = \frac{\Phi_{sv}}{\Phi_z} [-] \quad (4.1)$$

kde:

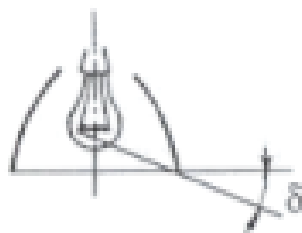
$\Phi_{sv}$  predstavuje veľkosť svetelného toku produkovaného svietidlom,

$\Phi_z$  predstavuje veľkosť svetelného toku produkovaného svetelným zdrojom[6]

Z rovnice vyplýva zaujímavý fakt a to, že svetelný tok zdroja je maximálny v prípade, ak nie je obklopený svietidlom, prevažne jeho konštrukčnými časťami, ktoré pohlcujú časť tohto svetelného toku.

### Uhol clonenia

Jedná sa o uhol zaclonenia daného svetelného zdroja konštrukčnou časťou svietidla. Uhol clonenia predstavuje najmenší ostrý uhol, medzi vodorovnou rovinou a priamkou spájajúcou okraj daného svietidla s fotometrickým stredom svetelného zdroja[8].



Obr. 4.3: Grafické znázornenie parametra uhla clonenia[8]

## 5 Meranie svetelnotechnických veličín vo fotometrii

Existuje niekoľko metód, prístrojov a postupov, ktorých hlavným cieľom je určenie svetelnotechnických veličín svetelných zdrojov, svietidiel či osvetľovacích sústav. Jednotlivé merania sa vyhodnocujú, v závislosti na použítom zdroji svetla, v rámci predpísaných uzákonených všeobecne platných noriem.

Metodológia meraní sa rozdeľuje na vizuálnu a fyzikálnu. Vizuálne metódy, používané vo fotometrii, spoliehajú na použitie fotometrického pozorovateľa. Tieto metódy nemôžeme považovať za presné, vzhľadom na selektívnu úroveň spektrálnej citlivosti daného pozorovateľa. Vzhľadom na popísanú skutočnosť majú vizuálne metódy množstvo nevýhod v porovnaní s prístrojovými metódami, a preto nie sú v súčasnosti tak početne využívané.

Druhú skupinu tvoria fyzikálne metódy, ktoré sú realizované za použitia špeciálnych prístrojov využívajúcich vlastnosti senzorov, ktoré sú schopné detekovať svetelné žiarenie[2].

Pre meranie fotometrických veličín boli prijaté všeobecne platné normy. K uvedeným normám radíme normu ČSN EN 13032 „Světlo a osvětlení – Měření a uvádění fotometrických údajů světelných zdrojů a svítidel“ z roku 2005, a normu ČSN 36 0011 „Měření osvětlení vnitřních prostorů“ z roku 2006[1].

### 5.1 Vizuálna fotometria

Vizuálna fotometria je bežne užívaná k určeniu rovnosti jasů či svietivosti, pozorovaného zdroja svetla a svetelnej normály. Vzhľadom na spektrálnu citlivosť pozorovateľa, a akýsi ľudský faktor, je samozrejmé, že prostredníctvom vizuálnej fotometrie nie je možné určiť absolútne hodnoty skúmaných svetelných veličín neznámeho zdroja svetla, ktoré sú objektom nášho záujmu. Je však možné určiť orientačnú hodnotu jasů, svietivosti, za predpokladu, že skúmaný neznámi zdroj má rovnakú chromatickosť, ako zdroj známy, ktorý slúži ako zdroj zrovnávací. V prípade, že sa svetelná chromatickosť zdrojov líši, je nutné ju upraviť prostredníctvom špeciálnych filtrov[2].

### 5.2 Fyzikálna fotometria

Fyzikálna fotometria predstavuje štruktúru metód a postupov, pri ktorých je nahradený fotometrický pozorovateľ, ako potenciálny zdroj neurčitostí, a chýb merania,

fotometrickými prístrojmi, ktoré zachytávajú, posudzujú, svetelné technické parametre svetelných zdrojov, a svietidiel, prostredníctvom fotometrických senzorov.

Základné ustanovenia, ktoré sa týkajú fyzikálnej fotometrie sa nachádzajú v norme N.106, ktorú prijala CIE, ako aj Medzinárodný výbor pre miery a váhy v Paríži. Uvedená norma obsahuje definíciu kandely, ako základnej jednotky používanej vo fotometrii, ako aj ďalšie podstatné odvodené a vedľajšie jednotky, a zákonitosti[2].

## 5.2.1 Meranie svietivosti

Základným prvkom uvedenej metódy je tzv. fotometrická kocka, ktorá zabezpečuje vhodné fotometrické pole a mechanizmus na ovplyvňovanie mohutnosti svietivosti neznámeho zdroja, či ovplyvňovanie mohutnosti svietivosti zrovnávacieho zdroja svetla[2].

Funkciu fotometrickej kocky môže plniť optický hranol, ktorý odráža svetlo dopadajúce z neznámeho zdroja svetla z jednej strany, pričom z druhej strany odráža svetlo normály známeho zrovnávacieho zdroja smerom k pozorovateľovi. Takto odrazené svetlo z neznámeho zdroja a svetelnej normály, či zrovnávacieho zdroja, je smerované do oka, kde pozorovateľ dokáže vyhodnotiť rovnosť, či naopak nerovnosť, svietivosti uvedených zdrojov osvetlenia. Súčasťou uvedenej vizuálnej fotometrickej metódy je aj fotometrická lavica, ktorej účelom je prostredníctvom zmeny vzdialenosti spomínaných zdrojov zmenšiť, alebo naopak zväčšiť svietivosť uvedených zdrojov.[2]

Metodika merania môže mať nasledujúci priebeh. Neznámy zdroj svetla sa upevní na jeden koniec fotometrickej lavice, zatiaľ čo zrovnávací svetelný zdroj, ktorého fotometrické parametre sú známe, sa upevní na opačnú stranu fotometrickej lavice. Následne je svetlo odrazené fotometrickým hranolom vyhodnocované pozorovateľom, ktorý určí, či je hodnota svietivosti oboch zdrojov totožná. V prípade, ak fotometrický pozorovateľ nemôže konštatovať rovnosť svietivostí uvedených zdrojov, upraví sa vzdialenosť skúmaného zdroja, a proces vyhodnocovania sa opakuje. Ak pozorovateľ v procese vyhodnocovania určí zhodu svietivostí, potom je možné určiť orientačnú hodnotu svietivosti skúmaného zdroja z nasledujúceho vzťahu[2]:

$$\frac{I_Z}{I_N} = \frac{l_Z^2}{l_N^2} [cd, cd; m, m] \quad (5.1)$$

po úprave:

$$I_N = \frac{l_N^2}{l_Z^2} * l_Z [cd, cd; m, m] \quad (5.2)$$

kde:

$I_N$  predstavuje svietivosť neznámeho zdroja svetla,  
 $I_Z$  predstavuje svietivosť zrovnávacieho zdroja svetla, prípadne svetelnej normály,  
 $l_N^2$  vyjadruje vzdialenosť neznámeho zdroja,  
 $l_Z^2$  vyjadruje vzdialenosť známeho zrovnávacieho zdroja.[2]

### 5.2.2 Meranie osvetlenosti

Meranie osvetlenosti patrí medzi najčastejšie realizované fotometrické meranie, určené hlavne k stanoveniu svetelných parametrov daného prostredia. Meranie je realizované za pomoci fotometrického prístroja, ktorý sa nazýva luxmeter. Luxmeter je zariadenie, ktorého hlavnú časť tvorí kremíkový fotoelektrický článok, ktorý reaguje na množstvo dopadajúceho žiarenia. Ďalšou súčasťou luxmetra je kosínusový nastaviteľ a indikátor nameraného osvetlenia, ktorý môže byť buď analógový alebo digitálny. Z hľadiska celkovej chyby prístroja  $f_c$  rozdeľujeme jednotlivé luxmetry do niekoľkých tried presnosti. Jednotlivé triedy presnosti sú označené buď numericky vzostupne od čísla 1 až 4, respektíve sa udomácnilo aj písmenové označenie L, A, B, C. Triedam presnosti odpovedá celková chyba 2%, 5%, 10%, 20%.[2]



Obr. 5.1: Digitálny luxmeter typu PU 550 Metra Blansko[2]

V prípade realizovania merania s luxmetrom musíme dbať na určité predpísané predpisy vychádzajúce z noriem. Ak má luxmeter indikátor, ten musí byť upevnený tak, aby na ňom mohla byť nastavená nulová hodnota, rovnako ak má prístroj zabudovaný vlastný zdroj napätia, musí byť prítomný indikátor, ktorým je možné

overiť stav batérie. Hlavica luxmetra by nemala mať menšiu plochu ako 30 mm. V prípade merania osvetleného priestoru s určitou nenulovou úrovňou osvetlenia, sa odporúča umiestniť luxmeter na dobu približne 5 minút do meraného prostredia, za účelom požadovanej adaptácie svetelného senzora. Rovnako musí osoba, ktorá meranie vykonáva dávať pozor, aby svojou činnosťou nezvyšovala nepresnosť merania, a to možným zatienením a pod..

Meranie luxmetrom môže byť ovplyvnené aj vlastnosťami konkrétneho pozorovaného zdroja osvetlenia. Merané zdroje musia byť v prevádzke odpovedajúcu dobu, aby sa mohli ich svetelné parametre ustáliť na pracovných hodnotách. Osoba realizujúca meranie musí počítať s faktom, že sa svetelné vyžarovanie zdroja svetla často mení v závislosti na teplote prostredia, preto sa v správe z merania udáva teplota okolitého prostredia.

Obyčajne sa meraním určujú body pracovnej roviny, ktoré sú umiestnené v závislosti, či sa jedná o vnútorný alebo vonkajší priestor v predpísaných vzdialenostiach od podlahy, vozovky atď.. Následne sa určí priemerná hodnota osvetlenosti, ako aritmetický priemer vychádzajúci z nameraných hodnôt osvetlenosti kontrolných bodov[2].

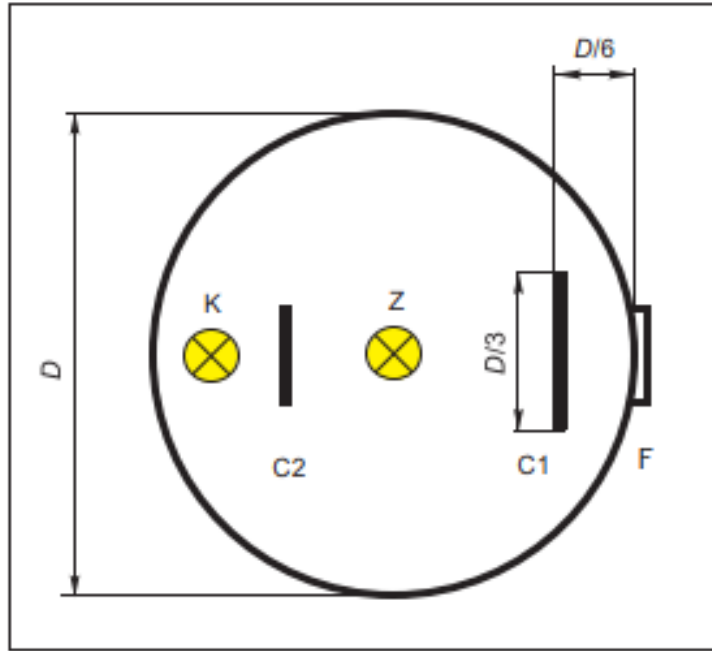
### 5.2.3 Meranie svetelného toku

Svetelný tok zdroja, popřípade svietidla, je možné určiť použitím integrátora alebo prostredníctvom graficko-početných metód z nameraných kriviek svietivosti, ktoré je možné určiť prostredníctvom goniofotometra.

#### Meranie svetelného toku prostredníctvom integrátora

Integrátor je zariadenie, prevažne guľového tvaru, ktoré sa vo fotometrickom laboratóriu využíva na meranie svetelného toku neznámeho svetelného zdroja  $\Phi_N$  substitučnou metódou. Vnútorný povrch integrátora je opatrený náterom, s pomerne vysokým činiteľom odrazu, dosahujúcim hodnoty  $\rho=0.75$  až  $\rho=0.85$ . Príslušné ošetrovanie vnútorného povrchu integrátora umožňuje mnohonásobné odrazenie svetelných lúčov, čím je možné doceliť pomerne rovnomernú osvetlenosť, vo vnútorných priestoroch gule, a táto hodnota je následne zaznamenávaná fotometrom, ktorý je umiestnený v meracom výklenku integrátora. Schému opisovaného zariadenia je možné vidieť na obr. 5.2[2].

V prípade umiestnenia skúmaného svetelného zdroja do vnútra integrátora, a za predpokladu rovnomerného rozloženia osvetlenosti, ktorá vznikla mnohonásobným odrazom od vnútorného povrchu integrátora, určíme vzťah prepočtu medzi svetel-



Obr. 5.2: Náčrt konštrukcie guľového integrátora[2]

ným tokom svetelnej normály, a tokom skúmaného neznámeho zdroja nasledovne[2]:

$$\Phi = \rho\Phi_N + \rho^2\Phi_N + \rho^3\Phi_N + \rho^4\Phi_N + \dots + \rho^n\Phi_N = \frac{\rho}{1 - \rho} * \Phi_N \quad (5.3)$$

kde:

$\rho$  je parameter, ktorý vychádza z odrazivosti vnútorného povrchu integrátora.

Hodnotu osvetlenosti, v závislosti na rozmeroch integrátora, môžeme určiť nasledujúcim spôsobom[2]:

$$E = \frac{\Phi}{\pi D^2} = k_i * \Phi_N \quad (5.4)$$

kde:

$D$  je priemer použitého zariadenia (priemer integrátora je zásadný parameter, ktorý sa odvíja od veľkosti svetelných zdrojov, ktorých svetelný tok je možné integrátorom zmerať),

$k_i$  predstavuje konštantu integrátora, ktorá je uvedená v dokumentácii k príslušnému zariadeniu, respektíve je možné ju určiť z nasledujúceho vzťahu[2]:

$$k_i = \frac{\rho}{\pi D^2(1 - \rho)} \quad (5.5)$$

Meranie svetelného toku neznámeho zdroja s použitím guľového integrátora má dve značné výhody, je pomerne jednoduché a relatívne rýchle, avšak keďže sa jedná



o pomernú metódu merania, musí byť prítomný ďalší svetelný zdroj, ktorého svetelné parametre sú známe. Tento fakt môže predstavovať značnú nevýhodu, prípadne komplikáciu, v procese merania.

Postup merania, v prípade malých svetelných zdrojov, prebieha tak, že sa prostredníctvom svetelnej normály, známeho zdroja svetla, určí parameter integrátora, a následne sa zamení známy zdroj za zdroj, ktorého svetelný tok chceme určiť. Svetelný tok neznámeho zdroja je následne daný súčinom hodnoty konštanty integrátora a svetelným tokom určeným prostredníctvom luxmetrom zachytenej hodnoty osvetlenia.

V prípade veľkých svietidiel, s dodatočnými konštrukčnými súčastami, je proces merania rozdielny, a to z dôvodu vzniku možných zatienení a neistôt merania. Tieto nedokonalosti sú spôsobené nedokonalým odrazom svetla, ktorý je prevažne spôsobený zatienením nadbytočnými konštrukčnými časťami svietidla. V prípade uvedeného problému, vyskytujúceho sa pri určovaní hodnoty svetelného toku svietidla, prebieha meranie s dodatočným tzv. korekčným zdrojom svetla, ktorý tento neželaný stav koriguje.

Merací proces s korekčným zdrojom prebieha v praxi nasledovne[2]:

1. V prvom kroku merania sa vyhodnocuje osvetlenie známeho svetelného zdroja (svetelnej normály)  $E_N$ ,
2. Následne sa určí osvetlenie  $E_{kN}$  pri zapnutom korekčnom zdroji a vypnutom známom zdroji,
3. Určí sa osvetlenie  $E_{kx}$  korekčného zdroja, pri vypnutom skúmanom zdroji,
4. Nakoniec sa určí hodnota osvetlenia  $E_x$  skúmaného svetelného zdroja svetla, pri vypnutom korekčnom zdroji.

Po ukončení opísaného postupu, vypočítame svetelný tok skúmaného svetelného zdroja z uvedenej rovnice[2]:

$$\Phi_x = \Phi_N \frac{E_x}{E_N} * \frac{E_{kN}}{E_{kx}} [lm; lm, -] \quad (5.6)$$

## Meranie svetelného toku prostredníctvom goniofotometra

Goniofotometer je zariadenie, ktoré tvorí pomerne štandardnú výbavu akéhokoľvek laboratória, ktoré sa zaoberá meraním a zaznamenávaním fotometrických parametrov svetelných zdrojov, a svietidiel. Primárne sa jedná o zariadenie, ktoré prostredníctvom krokových motorov otáča svietidlom, poprípade svetelným senzorom, v rôznych fotometrických rovinách a uhloch, s cieľom získať krivku svietivosti, v danej špecifickej fotometrickej rovine. Zaznamenávaním všetkých kriviek svietivosti môžeme určiť svetelnú plochu svietidla, ktorá popisuje vyžarovanie svietidla v priestore, konkrétnejšie rozdelenie vyžarovania svetelného toku svietidla do priestorového uhla, ktorý dané svietidlo obklopuje.

Na základe konštrukcie, špecifického rozloženia otočných častí, môžeme rozoznať tri základné typy goniofotometrov:

- a) Goniofotometer so statickým svetelným zdrojom a otočným fotometrom,
- b) Goniofotometer so statickým fotometrom, pohyblivým svetelným zdrojom, svietidlom,
- c) Goniofotometer so statickým svetelným zdrojom, fotometrom, a systémom zrkadiel smerujúcich svetivosť zdroja smerom k fotometrickému senzoru[9].

Uvedené konštrukčné typy goniofotometrov sa od seba líšia, samozrejme, rozličným rozložením otočných častí, avšak aj určitými výhodami, či naopak nevýhodami, vyplývajúcimi z ich konštrukcie. V prípade goniofotometra s otočným svietidlom, svetelným zdrojom, je výhodou pomerne jednoduchá konštrukcia, avšak kvôli pohybu svietidla nemôže byť úplne zaručená pracovná poloha meraného svietidla.

Všetky označené druhy goniofotometrov by sa mali vyznačovať dostatočnou tuhosťou, aby svojím pohybom nespôsobovali nepatričné rozkmitanie aktívnych častí svietidla, čo by spôsobilo hromadenie chyby merania, a tým pádom kompromitovalo výsledky meracieho procesu. Pomerne podstatnou vlastnosťou, ktorú by mali jednotlivé zariadenia spĺňať, je doporučená vzdialenosť svetelného senzora, fotometra, od meraného svietidla, teda by mali rešpektovať zákon o meraní parametrov bodového zdroja svetla[2].

### **Meranie svetelného toku svietidla početnou metódou**

Pre vyjadrenie svetelného toku  $\Phi$  je nutné poznať hodnoty svetivosti, v závislosti na priestorovom uhle, v okolí svietidla, to v praxi znamená mať povedomie o úplnej vyžarovacej ploche svietidla. V každom bode takto myslenej vyžarovacej plochy, ktorá je vymedzená párom uhlov  $\gamma, \theta$ , vieme následne priradiť hodnotu svetivosti  $i_{\gamma\theta}$ . Na základe popísaného faktu je možné určiť hodnotu svetelného toku, ktorý odpovedá myslennému bodu na plášti pomyslenej gule obklopujúcej svietidlo[5]. Tento svetelný tok získame úpravou vzťahu 2.6[10]:

$$d\Phi = I_{\gamma\theta} * \Delta\Omega_{\gamma\theta}[lm; cd, sr] \quad (5.7)$$

Celkový svetelný tok je možné určiť integráciou jednotlivých elementárnych svetelných tokov  $\Delta\Phi$  v rámci celej guľovej plochy, ako ukazuje nasledujúci vzťah[10]:

$$\Phi = \int^{4\Pi} d\Phi[lm; cd, sr] \quad (5.8)$$

Matematický vzťah je následne možné upraviť s prihliadnutím na rovnicu 5.7, na základe ktorej určíme celkový svetelný tok[10]:

$$\Phi = \int^{4\Pi} I_{\gamma\theta} * d\Omega_{\gamma\theta}[lm; cd, sr] \quad (5.9)$$

kde:

$d\Omega_{\gamma\theta}$  je priestorový uhol, ktorý vymedzujú uhly  $\gamma$  a  $\theta$ .

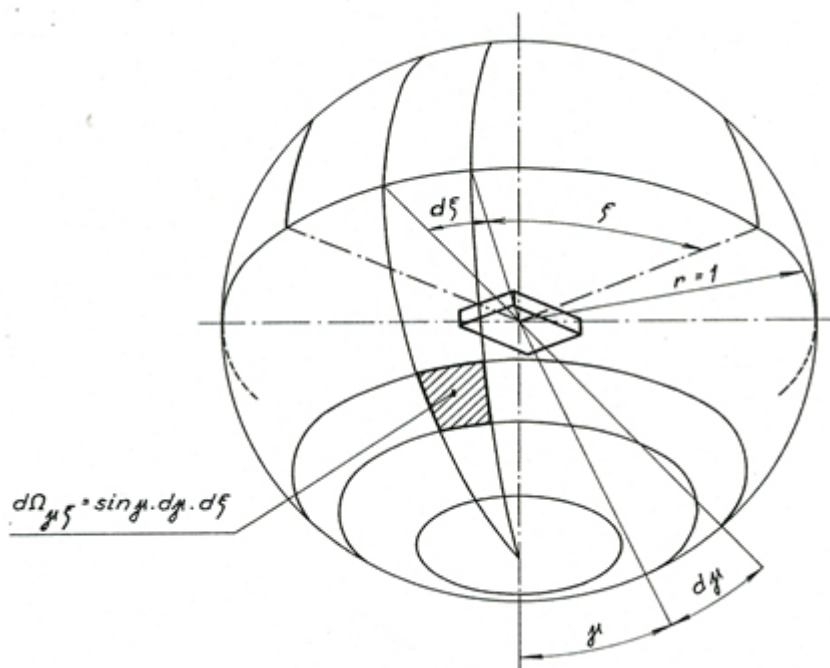
Tento priestorový uhol, vymedzený príslušnými uhlami, môžeme v systéme fotometrických rovín C- $\gamma$  vyjadriť[10]:

$$d\Omega_{\gamma\theta} = \sin \gamma * r * d\gamma * d\theta [sr; -, -, -] \quad (5.10)$$

kde:

$r$  je polomer gule, pričom v prípade, že sa jedná o jednotkovú guľu je možné uvedený vzťah ďalej zjednodušiť,

$d\gamma$  a  $d\theta$  predstavujú elementárnu zmenu uhlov vymedzujúcich povrch na plášti gule, bližšie vyobrazenie uvedených skutočností je zobrazené na obr. 5.3.



Obr. 5.3: Grafické znázornenie určenia veľkosti elementárneho priestorového uhla  $d\Omega_{\gamma\theta}$  na povrchu jednotkovej gule[5]

Vďaka vyjadreniu elementárneho priestorového uhla  $d\Omega_{\gamma\theta}$ , dokážeme upraviť predchádzajúce rovnice 5.7, 5.9. V rámci ušetrenia času upravíme len rovnicu 5.9, a to nasledujúcim spôsobom:

$$\Phi = \int_0^{2\Pi} \int_0^{\Pi} I_{\gamma\theta} * \sin \gamma * d\gamma * d\theta [lm; cd, sr] \quad (5.11)$$

## Určenie svetelného toku $\Phi$ metódov pásmových tokov

Jedná sa o metódu, ktorá aproximuje postup výpočtu svetelného toku  $\Phi$  svetelného zdroja, poprípade svietidla, ako celkový súčet čiastočných svetelných tokov  $d\Phi$  vymedzených guľovými pásmi, definovanými v závislosti na uhle  $\gamma$ . Vo všeobecnosti môžeme určiť hodnotu čiastočného priestorového uhla  $\Delta\Omega_\gamma$ , ktorý vymedzuje guľový pas, ako[5]:

$$\Delta\Omega_\gamma = 2\pi[\cos(\gamma - \Delta\gamma) - \cos(\gamma + \Delta\gamma)] = 4\pi * \sin\Delta\gamma * \sin\gamma[sr] \quad (5.12)$$

Hodnotu čiastočných svetelných tokov  $d\Phi$ , určitého guľového pásu, je potom možné podľa predchádzajúceho vzťahu 5.7 vyčíslieť, ako[10]:

$$\Delta\Phi_\gamma = 4\pi * \sin\Delta\gamma * \sin\gamma * I_\gamma[lm] \quad (5.13)$$

Súčtom čiastočných svetelných tokov  $d\Phi$  získame celkový svetelný tok  $\Phi$  guľového pásu.

Rovnaký postup aplikujeme aj na ostatné guľové pásy, vymedzené v závislosti na uhle  $\gamma$ . Svetelný tok  $\Phi$ , vymedzený celkovým priestorovým uhlom  $\Omega$ , v prípade nesúmerného zdroja svetla stanovíme v závislosti na rovnici 5.14[10].

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^m \Delta\theta * \Phi_i[lm] \quad (5.14)$$

kde:

$m$  vyjadruje členenie jednotlivých guľových pásov tvoriacich celkovú vyžarovaciu plochu gule.

Uvedená metóda je implementovaná v programe používateľského rozhrania, čo programu umožňuje určiť svetelný tok  $\Phi_z$  meraného zdroja svetla.

### 5.2.4 Meranie jasů

Jas predstavuje podstatnú fotometrickú veličinu, ktorá vplýva na zrakovú pohodu ľudí v danom prostredí, a tým pádom určuje kvalitatívne vlastnosti osvetlenia daného prostredia. Na meranie jasů sa podobne, ako to bolo pri meraní osvetlenosti, používa špeciálny prístroj, ktorý nazývame jasomer. Zjednodušene je možné jasomer opísať, ako prístroj, ktorý má zabudovaný fotočlánok, slúžiaci na vyhodnocovanie hodnoty príslušnej fotometrickej veličiny, pričom je na tento fotočlánok nasadený tubus, ktorý je opatrený otvorom, situovaným, vo svojej prednej časti. Tento otvor vymedzuje veľkosť priestorového uhla  $\Omega$ . Z teoretického úvodu, ktorý bol zameraný na predstavenie a ozrejenie jednotlivých fotometrických veličín, by malo byť jasné, že jas patrí medzi odvodenú veličinu, a preto ho nie je možné merať priamo, avšak

je možné jej hodnotu určiť nepriamo prostredníctvom merania osvetlenosti. Vyhodnocovanie jasů prebieha tak, že sa prostredníctvom spomínaného fotosenzora určí hodnota normálovej osvetlenosti  $E_N$ , a následne sa určí hodnota jasů z uvedeného vzťahu[2]:

$$L = \frac{E_N}{\Omega} [cd * m^{-2}; lx, sr] \quad (5.15)$$

kde:

$L$  je jas plochy vymedzenej priestorovým uhlom,

$\Omega$  je priestorový uhol,

$E_N$  je hodnota normálovej osvetlenosti, teda osvetlenosti kolmej na senzorický povrch fotosenzora[1].

V závislosti na veľkosti skúmanej plochy, respektíve na veľkosti vymedzeného priestorového uhla, rozoznávame dva základné typy jasomerov, a to jasomery bodové a jasomery integračné.

Totožne, ako sa v prípade luxmetrov rozoznávajú rozličné prístroje v závislosti na triede presnosti, sa aj jasomery delia z ohľadom na svoju triedu presnosti. Patria sem triedy presnosti označené písmenami L, A, B a C, ktorým odpovedá najväčšia celková chyba merania 5%, 7,5%, 10%, a 15%[2].

## 5.3 Chyby a neistoty merania

Rovnako, ako pri iných meraniach, aj pri meraniach fotometrických veličín vznikajú chyby a neistoty merania. Chyby a neistoty merania popisujú rozdielnú hodnotu nameranej veličiny, vzhľadom na skutočnú hodnotu danej meranej veličiny. Vzhľadom k tomu, že skutočná hodnota sledovanej fotometrickej veličiny nie je v drvivej väčšine prípadov známa, bola za účelom vyjadrenia chýb merania stanovená tzv. konvenčne pravá hodnota, ktorá substituie hodnotu skutočnú[2].

Chyby merania je možné rozdeliť na absolútne a relatívne. Absolútna chyba vyjadruje rozdiel medzi skutočnou hodnotou, konvenčne pravou hodnotou a hodnotou, ktorá bola nameraná fotometrickým prístrojom. Tento typ chyby je možné vyjadriť nasledujúcim vzťahom[1]:

$$\Delta_x = x_m - x_S \quad (5.16)$$

kde:

$\Delta_x$  je absolútna chyba,

$x_m$  je hodnota nameraná fotometrickým prístrojom,

$x_x$  je skutočná hodnota meranej veličiny.

Naopak relatívnu chybu je možné určiť z absolútnej chyby tak, že jej hodnotu vydáme skutočnou hodnotou skúmanej veličiny[1].

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_S} = \frac{x_m - x_S}{x_S} \quad (5.17)$$

kde:

$\delta_x$  je relatívna chyba merania.

Chyby merania, okrem iného, posudzujeme v závislosti na ich periodickom výskyte z pohľadu súboru viacerých meraní. V prípade, že sa chyba pri opakovanom meraní nemení alebo sa mení predvídateľným spôsobom, hovoríme o chybe systematickej a naopak, ak sa chyba neustále mení, pričom nie je možné predvídať jej vývoj, hovoríme o chybe náhodnej. Systematické chyby je možné odstrániť napríklad úpravou zosilnenia, avšak náhodné chyby takýmto spôsobom odstrániť či kompenzovať nemôžeme, a preto je ich odstránenie veľmi náročné[2].

Ďalším podstatným parameterom v procese určovania správnosti nameraných hodnôt, sú neistoty merania. Neistotu merania predstavuje tzv. štandardná neistota. Štandardnú neistotu merania je možné stanoviť prostredníctvom štatistickej analýzy zo série nameraných hodnôt, v tomto prípade hovoríme o štandardnej neistote typu A alebo inými metódami, v tomto prípade zase hovoríme o štandardnej neistote typu B[1].

Príčiny vzniku štandardnej neistoty typu A nie sú známe, a preto sa pri jej vyčíslňovaní využívajú štatistické parametre získané zo súboru nameraných hodnôt danej veličiny. Neistotu typu A je možné vyčísliť nasledujúcim spôsobom:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{VR})^2} [\%] \quad (5.18)$$

kde:

$u_A$  predstavuje hodnotu štandardnej neistoty typu A,

$x_i$  je hodnota meranej veličiny "x" pri i-tom meraní,

$x_{VR}$  vyjadruje strednú hodnotu meranej veličiny,

$n$  vyjadruje celkový počet uskutočnených meraní[2].

Pri posudzovaní štandardnej neistoty typu A musí osoba určujúca hodnotu neistoty urobiť minimálne 10 platných meraní, pri rovnakých podmienkach, ak toto nie je možné splniť, potom sa výsledok pre násobí platným koeficientom z tab. 5.1.

Príčiny vzniku neistoty typu B sú vo všeobecnosti známe, poznáme čo ich spôsobuje, a aj to s akou pravdepodobnosťou sa vyskytujú. K neistotám typu B patrí napríklad nesprávne umiestnenie fotoreceptora do pracovnej polohy, nelinearita a pod.. Určitú neistotu typu B je možné určiť z maximálnej veľkosti chyby  $z_{max}$ ,

Tab. 5.1: Hodnoty koeficientov používaných pre stanovenie neistoty merania[1]

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4	1.7	2.3	7

ktorú najčastejšie nájdeme v katalógu výrobcu daného fotometrického zariadenie. Neistotu typu  $B$  vypočítame nasledovne[1]:

$$u_B = \frac{z_{max}}{\chi} [\%] \quad (5.19)$$

kde:

$u_B$  predstavuje hodnotu štandardnej neistoty typu  $B$ ,

$z_{max}$  vyjadruje medznú hodnotu intervalu v ktorom sa chyba nachádza,

$\chi$  vyjadruje činiteľ pravdepodobnosti statického rozdelenia uvažovanej chyby.

V prípade, že sa nám podarilo určiť všetky neistoty typu  $A$ , a zároveň neistoty typu  $B$ , môžeme vyjadriť celkovú kombinovanú štandardnú neistotu  $u_C$ . Kombinovanú štandardnú neistotu potom zapíšeme takto[11]:

$$u_C = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + \dots + u_{An}^2 + u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + \dots + u_{Bn}^2} \quad (5.20)$$

### 5.3.1 Chyby a neistoty merania - Goniofotometer

Laboratórne zariadenie goniofotometer v sebe združuje celú radu štandardných typov neistôt, ktoré môžeme nasledovne popísať:

1. Neistota vyplývajúca z meracieho prístroja, senzora,
2. Neistota vplyvu konečných rozmerov vyžarovacej plochy zdroja svetla a fotočlánku,
3. Neistota vyplývajúca zo vzájomnej polohy zdroja svetla a fotočlánku,
4. Nestabilita svetelného zdroja a pridružených zariadení,
5. Neistota uhlového posunutia ramena, motora goniofotometra,
6. Neistota metodiky vyčíslenia vzdialenosti zdroja svetla od fotometrického senzora.

Celková neistota goniofotometra vychádza následne zo všetkých popísaných typov neistôt, ktoré sa v prípade tohto zariadenia vyskytujú[11].

#### Neistota vyplývajúca zo vzájomnej polohy svetelného zdroja a senzora

V prípade nesprávneho upevnenia svetelného zdroja, či fotometrického senzora, sa môže vyskytnúť chyba meranie v závislosti na vzájomnej polohe týchto dvoch prvkov. Chyba je spôsobená konkrétne odklonením jedného z uvedených prvkov od

spojnice, ktorá by mala prechádzať optickým stredom svetelného zdroja a fotocitlivou plochou svetelného senzora. Uvedenú neistotu merania je možné vyčíslit nasledovne[11]:

$$u_{Bp} = \frac{1 - \cos \beta}{2} * 100[\%] \quad (5.21)$$

kde:

$\beta$  je uhol, ktorý pri zlom upevnení senzora, zdroja, predstavuje odklon od pomyslenej spojnice medzi týmito dvoma prvkami.

### **Nestabilita svetelného zdroja a pridružených zariadení**

Jedná sa o neistotu, ktorá v sebe združuje niekoľko typov neistôt, a to neistoty zdroja napätia, či napájania, čiastkovú neistotu svetelného zdroja a neistotu fotočlánku. Neistota dosahuje v prípade laboratórnych podmienok hodnotu približne  $u_{Bs} = 0.5\%$ . Túto neistotu je možné vyjadriť, ako[11]:

$$u_{Bs} = \frac{\frac{Y_{max}}{Y_{min}} - 1}{\sqrt{3}} * 100[\%] \quad (5.22)$$

kde:

$Y_{max}$  je maximálna hodnota veličiny na fotometry v čase  $t = 0[s]$ ,

$Y_{min}$  je minimálna hodnota výstupu v čase od  $t = 0[s]$ , do  $t = \tau$ .

### **Neistota metodiky vyčíslenia vzdialenosti zdroja svetla od fotometrického senzora**

V prípade určenia vzdialenosti svetelného zdroja, od svetelného senzora, sa vždy stretávame s neistotou merania, ktorá je prevažne spôsobená metódou merania vzdialenosti a skúsenosťami pracovníka, ktorý meranie realizuje. V praxi je možné túto neistotu minimalizovať použitím kvalitných meracích prístrojov. Štandardnú neistotu určovania vzdialenosti vyjadríme ako[11]:

$$u_{Bl} = \frac{Z_{lmax}}{l_d * \sqrt{3}} * 100[\%] \quad (5.23)$$

kde:

$Z_{lmax}$  predstavuje najväčšiu možnú chybu vzdialenosti fotometrického streda svietidla, svetelného zdroja, a fotocitlivej plochy senzora,

$l_d$  predstavuje vzdialenosť streda fotometra, či svetelného senzora, od svetelného streda zdroja, prípadne svietidla.



### Neistota vyplývajúca z chyby meracieho prístroja

Neistota merania, ktorá je spájaná s meracím prístrojom, použitým v procese merania. Vo všeobecnosti sa môže jednať o akékoľvek meracie zariadenie, či už sa jedná o luxmeter, jasomer, alebo spektrometer. Uvedená neistota je väčšinou uvedená v dokumentácii, ktorá je priložená, a vzťahuje sa ku konkrétnemu meraciemu prístroju. Túto neistotu určíme nasledovne[11]:

$$u_{BE} = \frac{\frac{\delta_l}{100} - \frac{N \cdot R}{X}}{\sqrt{3}} * 100[\%] \quad (5.24)$$

kde:

$\delta_l$  je chyba, ktorú je možné nájsť v priloženej dokumentácii k meraciemu prístroju, túto dokumentáciu poskytuje výrobca,

$N$  udáva počet platných čísiel s možnou chybou,

$R$  udáva hodnotu platnej číselnice s najmenšou hodnotou,

$X$  predstavuje hodnotu, ktorú je možné odčítať z meracieho prístroja.

### Neistota vplyvu konečných rozmerov vyžarovacej plochy svetelného zdroja a fotočlánku

Neistota merania vychádzajúca z konečných rozmerov svetelného zdroja vyplýva z predpokladu, že svetelný zdroj, ktorého vlastnosti sa snažíme určiť je bodový. Popis bodového svetelného zdroja je objasnený v kapitole 2.7.1 *Bodový zdroj svetla*. Túto neistotu vieme pomerne jednoducho zredukovať v prípade, že dodržíme pravidlo o dostatočnej vzdialenosti svetelného zdroja od fotočlánku. V prípade, že je spomínané pravidlo dodržané, je veľkosť tejto neistoty  $< 1\%$ . Neistotu konečných rozmerov môžeme určiť z nasledujúceho zápisu:

$$u_{Bk} = \frac{1 - \left(\frac{r_0}{\sqrt{r_0^2 + (a+b)^2}}\right)^3}{\sqrt{3}} * 100[\%] \quad (5.25)$$

kde:

$r_0$  predstavuje vzdialenosť od stredu fotočlánku k stredu svetelného zdroja,

$a$  predstavuje polovičnú veľkosť charakteristickej veľkosti svetelného zdroja,

$b$  predstavuje polomer aktívneho povrchu fotočlánku[11].

### Neistota uhlového posunutia ramena, motora goniofotometra

Neistota uhlového posunutia ramena predstavuje neistotu merania, vychádzajúcu z konštrukcie samotného prístroja. Rameno, spolu s uchytným systémom pre svetelný zdroj, sprostredkúva rotáciu zdroja okolo spojnice medzi svetelným zdrojom

a senzorom. Vďaka rotácii zdroja, môžeme zachytiť hodnoty svietivosti v rozličných uhloch natočenia, čím zdokumentujeme vyžarovacie schopnosti konkrétneho zdroja osvetlenia. Spomínaná rotácia je umožnená vďaka motorom, ktoré sa na tento účel využívajú. Vo väčšine prípadov sa používajú krokové motory, poprípade servo motory. Konštrukcia, a vlastnosti, týchto motorov spôsobuje vznik spomínanej neistoty merania. Neistotu uhlového natočenia je možné vyjadriť nasledovne[11]:

$$u_{B\gamma} = \frac{\Delta\gamma_{max}}{\gamma_{vzt} * \sqrt{3}} * 100[\%] \quad (5.26)$$

kde:

$\gamma_{max}$  vyjadruje hodnotu maximálnej chyby uhla posunu ramena,

$\gamma_{vzt}$  predstavuje vzťažnú hodnotu uhla posunutia ramena.

## 6 Dátové formáty popisujúce svietidlá a ich svetelnotechnické parametre

V súčasnej dobe, kedy je na trhu enormné množstvo svietidiel, je nutné tieto zariadenia porovnávať a triediť v závislosti na určitých vlastnostiach, a parametroch. Tieto vybrané vlastnosti sa ustálili a stali sa súčasťou rôznych jednotných dátových formátov, ktoré sú používané, a väčšinou sprostredkované výrobcami svetelných zdrojov, a svietidiel.

Na zaznamenanie svetelnotechnických parametrov sa aktuálne používajú všeobecne uznávané dátové formáty:

- IES (Illuminating Engineering Society),
- Eulumdat.

### 6.1 Dátový formát IES

Dátový formát IES patrí medzi najstaršie, v súčasnosti, používané dátové formáty používané pre popis parametrov svetelných zdrojov a svietidiel. Uvedený formát vychádza z normy *IES LM-63-1986*, ktorá bola zavedená, ako jedna zo všeobecne uznávaných noriem v roku 1986, pričom moderná verzia tohto formátu je dodnes používaná v Amerike[12].

```
IESNA91[TEST]
Simple demo intensity distribution [MANUFAC]
Lightscape Technologies, Inc.
TILT=NONE
1
-1
1
8
1
1
2
0.0 0.0 0.0
1.0 1.0 0.0
0.0 5.0 10.0 20.0 30.0 45.0 65.0 90.0
0.0
1000.0 1100.0 1300.0 1150.0 930.0 650.0 350.0 0.0
```

Obr. 6.1: Ukážka súboru vo formáte IES[13]

Vďaka uvedenému formátu je možné tvoriť čiastočne štrukturované textové dokumenty, ktoré v sebe zahŕňajú vybrané parametre svietidiel. Vzniknutý textový dokument má koncovku **.ies**, a je špecifický svojím rozdelením na samostatné riadky, z ktorých každý obsahuje určitý parameter, záznam. Maximálna kapacita jedného

riadku je 132 znakov, pričom parametre môžu byť zvýraznené prostredníctvom hranatých zavoriek. Každý parameter svietidla musí byť situovaný na samostatnom riadku, pričom sekvencia znakov popisujúca daný parameter musí na konci obsahovať znaky <CR><LF> (carriage-return/line-feed), ktoré jednotlivé parametre oddeľujú. Štruktúra takéhoto .ies textového súboru je zobrazená na obr. 6.1[12].

### 6.1.1 Dátový formát EULUMDAT

Konkurenčným, všeobecne uznávaným, dátovým formátom, pre ukladanie fotometrických dát a vybraných technických dát, je formát používaný v Európe s názvom Eulumdat. Formát Eulumdat bol založený a predstavený v Nemecku v roku 1990. Podobne, ako v prípade formátu IES je výstupom tohto dátového formátu štruktúrovaný textový dokument s prísnu štruktúrou viditeľnou v priloženej tabuľke 6.1[14].

Tab. 6.1: Štruktúra dátového formátu Eulumdat[14]

Číslo riadka	Parameter, znak	Počet znakov
1	Údaje o výrobcovi	78
2	Indikátor typu svietidla (1-bodový zdroj symetrický s ohľadom na vertikálnu os, 2-lineárne svietidlo, 3-bodový zdroj s inou symetriou)	1
3	Indikátor symetrie svietidla (0 – svietidlo bez symetrie, 1 – svietidlo symetrické podľa vertikálnej osy, 2 – svietidlo symetrické podľa roviny $C_0-C_{180}$ , 3 – svietidlo symetrické podľa roviny $C_{90}-C_{270}$ , 4 – svietidlo symetrické podľa roviny $C_0-C_{180}$ a $C_{90}-C_{270}$ )	1
4	$M_c$ -Počet rovín C, v ktorých sa meranie vykonáva (0-360)	2
5	$D_c$ -Krok medzi jednotlivými C rovinami	5
6	$N_g$ -Počet nameraných hodnôt svietivosti v každej skúmanej rovine C (počet Gamma krokov v rovine C)	2
7	$D_g$ -Uhol medzi jednotlivými krokmi Gamma	5
8	Číslo merania, číslo protokolu	78
9	Názov svietidla	78
10	Číslo svietidla	78
11	Názov súboru	8
12	Dátum, kedy bolo meranie sprostredkované/meno osoby, ktorá meranie vykonala	78
13	Dĺžka svietidla [mm] (v prípade kruhového svietidla sa udáva nulová hodnota)	4

Číslo riadka	Parameter, znak	Počet zna- kov
14	Šírka svietidla [mm]	4
15	Výška svietidla [mm]	4
16	Dĺžka, priemer aktívnej časti svietidla [mm]	4
17	Šírka svetelnej plochy [mm] (v prípade kruhového svietidla sa udáva nulová hodnota)	4
18	Výška svetelnej plochy roviny $C_0$ [mm]	4
19	Výška svetelnej plochy roviny $C_{90}$ [mm]	4
20	Výška svetelnej plochy roviny $C_{180}$ [mm]	4
21	Výška svetelnej plochy roviny $C_{270}$ [mm]	4
22	DFF - množstvo svetelného toku prúdiaceho do spodnej roviny	4
23	Účinnosť svietidla LORL[%]	4
24	Konverzný faktor svietivosti (závislý na meraní)	6
25	Naklonenie svietidla v priebehu merania	6
26	Počet n sád svetelných zdrojov	4
26a	Počet svetelných zdrojov	$n*4$
26b	Typ svetelného zdroja/zdrojov	$n*24$
26c	Celkový svetelný tok $\Phi$ [lm] svetelného zdroja/zdrojov	$n*12$
26d	Teplotná chromatičnosť zdroja	$n*16$
26e	Index podania farieb CRI	$n*6$
26f	Príkon svetelného zdroja, spolu s napájacím zdrojom/predradným systémom	$n*8$
27	Činiteľ priamej osvetlenosti DR (index $k=0.6 \dots 5$ )	$10*7$
28	Uhly rovinou C ( $C_0$ predstavuje začiatok merania)	$M_c*6$
29	Uhol $\gamma$ medzi jednotlivými meraniami svietivosti v rámci jednej C roviny	$N_g*6$
30	Rozloženie svietivosti [cd/klm]	$(M_{c2}-M_{c1}+1)*N_g*6$

Tab. 6.2: Zmena parametrov  $M_{c1}$  a  $M_{c2}$  v závislosti od symetrie svietidla.

Parameter symetrie	$M_{c1}$	$M_{c2}$
$I_c=0$	1	$M_c$
$I_c=1$	1	1
$I_c=2$	1	$M_c/2+1$
$I_c=3$	$3*M_c/4+1$	$M_{c1}+M_c/2$
$I_c=4$	1	$M_c/4+1$

Z tabuľky 6.2 je možné vypočítať zmenu v rozsahu ukladania čiar svietivosti (C rovin), ktorá sa odvíja od parametra symetrie svetelného zdroja, či svietidla. Dôsledok symetrie svietidla je rovnosť hodnôt svietivosti v symetrických rovinách, čím sa meranie čiar svietivosti, a teda priestorového vyžarovania svietidla značne zjednodušuje, nie je totiž nutné ukladať a merať rovnaké hodnoty svietivosti, tie sa často dopĺňajú softvérovo.

## 7 Hardvér zariadenia

Cielom kapitoly je opis použitého hardvéru, jeho súčastí, od použitej vývojovej dosky s mikrokontrolerom (jednočipom), motorov, až po senzoriku, ktorú zostrojený goniofotometer využíva pre svoju činnosť. Zariadenie pozostáva z uvedených súčastí:

- Arduino Uno,
- motory Nema,
- Infračervené optické senzory (*Optocouplers*),
- Fotometrický senzor TSL2561,
- Motor Driver M542.

### 7.1 Arduino

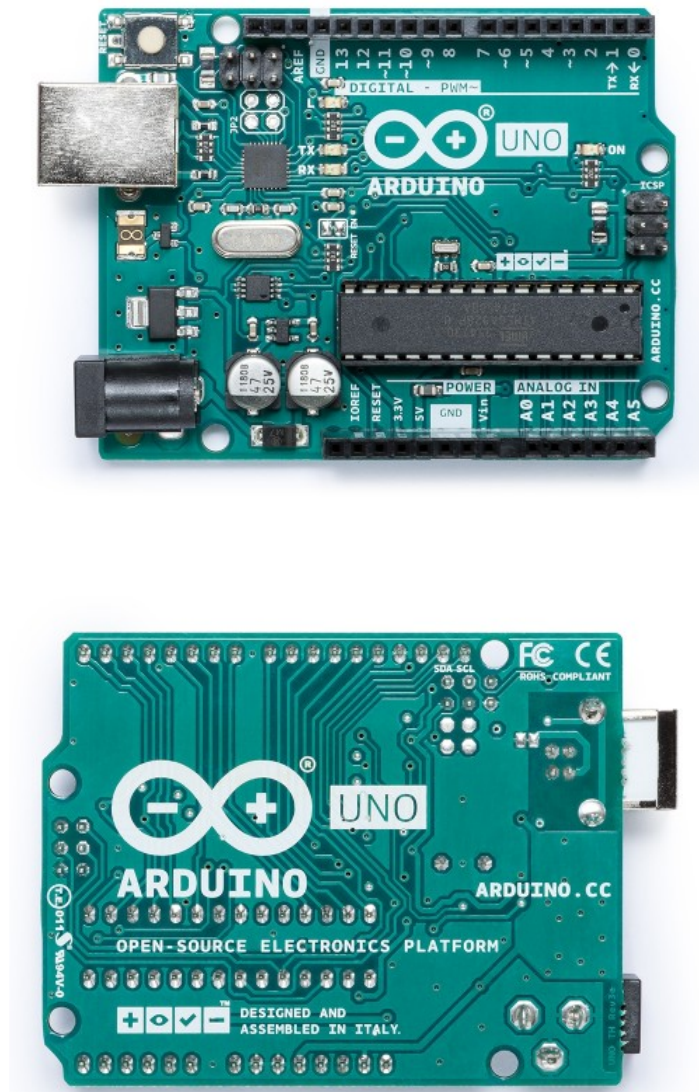
Arduino predstavuje pomerne jednoduchú vývojovú platformu, sprostredkovanú talianskou firmou Interaction Design Institute. Zakladatelia, spomínanej firmy, si v roku 2005 stanovili jasný cieľ, a to vytvoriť vývojový set, ktorý mal byť zameraný na študentov technických odborov. V uvedenom roku začal vývoj prvej dosky typu Arduino s tým, že táto mala nahradiť do tej doby pomerne drahé vývojové dosky BASIC Stamp. Od roku 2005 spoločnosť uviedla na trh pomerne rozsiahlu paletu dosiek série Arduino, pričom najrozšírenejšou je bezpochyby doska **Arduino UNO**, avšak veľmi populárne sú napríklad **Arduino Nano**, **Arduino Mini**, **Arduino Leonardo**, **Arduino Galileo**, **Arduino Mega2560**, a mnoho ďalších[15].

Základom, takmer každej dosky typu **Arduino**, je vo väčšine prípadov multikontroler poskytovaný firmou Atmel a prevodník umožňujúci komunikáciu s osobným počítačom, či iným zariadením, cez sériovú linku. Okrem uvedených komponentov môže doska Arduina obsahovať aj iné elektronické súčiastky, akými sú analógové a digitálne vstupy, poprípadе výstupy, diódy, a pod. Jednotlivé konštrukcie sa líšia v závislosti na type použitej dosky, a teda sa líšia aj komponenty, ktoré je možné na jednotlivých typoch vysledovať[15].

#### 7.1.1 Arduino UNO

Predstavuje najpoužívanejší typ dosky poskytovanej firmou Interaction Design Institute. Jedná sa o dosku, ktorá nadväzuje na hlavnú radu vychádzajúcu z pôvodnej dosky z roku 2005. Doska *Una* je založená na mikrokontroléri **ATmega328**. K jej perifériám patrí štrnásť digitálnych vstupno/výstupných pinov, z ktorých digitálne piny 3, 5, 6, 9, 10 a 11 poskytujú PWM výstup, ďalej šesť analógových vstupných pinov, USB konektor, napájací konektor, šesťnásť MHz keramický rezonátor a tlačidlo umožňujúce reset zariadenia. Z konštrukcie tejto dosky vychádzajú ďalšie dve

dosky, a to **Arduino Ethernet**, **Arduino Bluetooth**. Uvedené dosky majú v podstate rovnakú konštrukciu, ako použité **Arduino Uno**, avšak líšia sa odlišnými spôsobmi pripojenia[15].



Obr. 7.1: Arduino Uno[16]

## 7.1.2 Raspberry Pi

Alternatívou, k zmienenému Arduinu, je mikropočítač Raspberry Pi. Mikropočítač Raspberry Pi bol vyvinutý v roku 2012 nadáciou Raspberry Pi Foundation, a podobne ako Arduino mal priblížiť a zjednodušiť výuku informatiky, prevažne na



stredných, a vysokých školách. Vzhľadom na svoju cenu a rozmery, ktoré sú porovnateľné s Arduinom, sa stal mikropočítač Raspberry Pi, jeho hlavným konkurentom. Obdobne ako pri Arduine, aj tu sa uplatňujú dosky s rozličnými parametrami a počtom vstupov. Najpoužívanéjšie modely sú Raspberry Pi 3 (B) a Raspberry Pi Zero.

Základný rozdiel medzi doskou Arduino a modelom Raspberry Pi je prevažne v konštrukčnom prevedení. Zatiaľ čo doska Arduino je tvorená mikrokontrolerom, do pamäte ktorého programátor svoj kód nahráva, Raspberry Pi je tvorený mikropočítačom s vlastným nainštalovaným operačným systémom (Linux). Prehľad základných rozdielov je uvedený v tab. 7.1[17].

Tab. 7.1: Porovnanie vybraných parametrov Arduina vs. Raspberry Pi[17]

Technické zariadenie	Arduino Uno	Raspberry Pi
Typ	Mikrokontrolér	Mikropočítač
Programovací jazyk	Wiring (Obdoba jazyka C)	C, C++, Java, Python
Napájanie	20 mA / 5 V	800 mA / 5 V
Komunikačné piny	14 digitálnych + 6 analógových pinov	26 digitálne piny
Rozmery	68,6 x 53,4 mm	86,9 x 58,5 mm
Cena	194 Kč	1099 Kč

### 7.1.3 Výber zariadenia

Z hľadiska rozsahu, ktorý venujem Arduinu je asi zrejmé, že som sa v rámci návrhu prístroja goniofotometra rozhodol uprednostniť implementáciu vývojovej dosky Arduino, konkrétne typ Arduino Uno. Moje rozhodnutie je možné odôvodniť dostatočným hardvérovým vybavením konkrétnej dosky, ako aj cenou uvedeného zariadenia. V neposlednej miere k výberu prispeli predchádzajúce skúsenosti s touto platformou, a naopak nováčikovská neskúsenosť s platformou Raspberry Pi.

## 7.2 Fotometrický senzor

Goniofotometer, ako zariadenie na určovanie svetelných charakteristík svetelných zdrojov, musí byť schopné tieto svetelné veličiny, ako napríklad intenzitu osvetlenia zachytiť a zaznamenať. K tomu je zariadenie vybavené svetelným senzorom. Sensory optického žiarenia pracujú väčšinou na princípe fotoemisie, kedy je prostredníctvom dopadajúcich fotónov, na fotocitlivú plochu optického senzora, generovaný elektrický signál, ktorý je možné zaznamenať, a v závislosti na jeho hodnote určiť veľkosť svetelnej intenzity spomínaného dopadajúceho žiarenia.

V praxi sa uplatňujú prevažne tri hlavné typy fotodetektorov, konkrétne :

- Fotorezistory,
- Fotodiódy a fotočlánky,
- Fototranzistory.

Tieto prvky bývajú väčšinou súčasťou komplexnejších štruktúr obsahujúcich prídavnú elektroniku, ako napr. AD prevodník atď..

### **Fotorezistory**

Fotorezistory patria medzi jednoduché, pomerne citlivé fotosenzory pracujúce na princípe zmeny vodivosti vplyvom fotoelektrického javu. Štruktúrne pozostávajú z polovodičového materiálu, vyznačujúceho sa vlastnou vodivosťou. Jedná sa o polovodičovú štruktúru (CdS typu N), opatrenú kontaktmi, ktoré umožňujú pripojiť senzor do navrhovaného obvodu. V prípade, že svetlo o určitej intenzite dopadá na povrch fotorezistora, dochádza v jeho štruktúre ku generovaniu voľne nabitých častíc, čo má za následok zmenu odporu fotorezistora, a teda aj zmenu prúdu pritekajúceho do zapojenej sústavy. Citlivosť fotorezistora je definovaná, ako pomer medzi intenzitou žiarenia dopadajúceho na povrch fotorezistora a jeho odporom. Podobne definujeme aj spektrálnu citlivosť fotorezistora, a to ako podiel intenzity dopadajúceho optického žiarenia a odporu fotorezistora. Výhodou tohto typu optických senzorov je ich jednoduchosť, nízka cena, avšak veľkou nevýhodou je značná teplotná závislosť senzora v prípade nízkej intenzity dopadajúceho svetla, alebo dopadajúceho svetla zloženého so žiarením vyšších vlnových dĺžok. Musíme si tiež uvedomiť, že senzor produkuje analógovú hodnotu, a teda bez doplnkového hardvéru nie je použiteľný v prípade použitej dosky, ktorá obsahuje len digitálne vstupy[18].

### **Fotodiódy a fotočlánky**

Fotodiódy a fotočlánky patria medzi polovodičové prvky, ktoré konvertujú svetlo na elektrický prúd. Prúd je generovaný po dopade svetelnej častice na aktívny povrch fotodiódy, fotočlánku. Konštrukcia vychádza z P-N prechodu alebo štruktúry P-I-N. Keď fotón s dostatočnou hodnotou energie zasiahne diódu, povrch fotočlánku, vzniká voľný elektrón v štruktúrach polovodičového prvku. Týmto spôsobom vzniká pohyblivý elektrón a kladne nabitá elektrónová diera[18].

### **Fototranzistory**

Fototranzistory môžeme jednoducho popísať, ako tranzistory, ktoré sú riadené v závislosti na intenzite dopadajúceho žiarenia. Fototranzistory klasicky delíme na

dva základné typy, konkrétne NPN a PNP. Princíp činnosti spočíva v zachytávaní žiarenia dopadajúceho na bázu fototranzistora, čo má za následok vznik párov elektrón-diera, ktoré sú rozdelené kolektorovým a emitorovým prechodom, čo vplyva na zmenu hodnoty potenciálu na tomto prechode. Vzhľadom na polarizáciu emitorového prechodu v priepustnom smere, vyvolá zmena napätia výraznú zmenu kolektorového prúdu. Spektrálna citlivosť fototranzistorov sa v praxi upravuje použitím špeciálnych filtrov, ktoré odfiltrujú neželané zložky dopadajúceho žiarenia. Medzi najväčšie výhody fototranzistorov patria nízka cena, spektrálna citlivosť v oblasti viditeľného žiarenia, výrazné zosilnenie, kompaktné rozmery, avšak vyznačujú sa aj nevýhodami vychádzajúcimi z ich konštrukcie, konkrétne sem môžeme zaradiť pomerne dlhý čas odozvy v porovnaní s reakčným časom fotodiódy[18].

### 7.2.1 Výber fotosenzora

V dnešnej dobe je na trhu obrovské množstvo spoločností, ktoré sa zaoberajú výrobou a vývojom senzorov, ktoré sú následne implementované, ako súčiastky do samostatných zariadení. Čo sa týka senzorov žiarenia, konkrétne senzorov optického žiarenia odpovedajúceho spektrálnemu rozloženiu citlivosti ľudského pozorovateľa, ani tieto nie sú výnimkou. Výber senzora potrebného na zachytenie dopadajúcej intenzity osvetlenia generovaného skúmaným svetelným zdrojom sa odvíja s ohľadom na niekoľko parametrov. Medzi podstatné parametre patrí kompatibilita s vývojovou doskou Arduino Uno, rýchlosť odozvy, schopnosť senzora zachytiť žiarenie určitého spektrálneho pásma, cena, ako aj ďalšie parametre odvíjajúce sa od všeobecných podmienok, v ktorých bude navrhované zariadenie, vybraný senzor, pracovať.

V procese návrhu prístroja boli vytipované tieto svetelné senzory **TEMT6000**, **BH1750**, **TSL2561** a **OPT3001**. Sensory boli vybrané prevažne kvôli výbornej kompatibilite so zariadením Arduino Uno, avšak je nutné podotknúť, že sa nejedná o celkový sortiment senzorov, ktoré sú dostupné a použiteľné pre túto prácu.

Tab. 7.2 zovšeobecňuje základné parametre vybraných svetelných senzorov. Výraznejší principiálny konštrukčný rozdiel vidíme len u senzora **TEMT6000**, ktorý využíva technológiu fototranzistora, pri určovaní intenzity dopadajúceho žiarenia a produkuje analógový signál, čo v prípade dosky Arduino Uno nie je problém, avšak nemusí to byť pravidlom, a iný typ dosky Arduino, prípadne iné zariadenie (Raspberry Pi, mikrokontroler) môže mať so zachytením analógového signálu problém. Keďže senzor pozostáva z fototranzistora, oproti iným navrhnutým svetelným senzorom, môže byť jeho integračný čas dlhší, čo treba brať do úvahy v prípade vybraného senzora. Dlhší integračný čas senzora môže predĺžiť proces merania skúmaného zdroja svetla. Ostatné vytipované senzory **TSL2561**, **TEMT6000** a **OPT3001** sú parametrovo, a v podstate ja konštrukčne, veľmi podobné.

Z hľadiska parametrovej "výkonnosti" vychádza najlepšie posledný zmieneny senzor **OPT3001**, ktorý svojich súperov poráža väčším dynamickým rozsahom, a taktiež väčším rozlíšením hodnoty intenzity dopadajúceho žiarenia. Zvýšené schopnosti senzora **OPT3001** sa však prejavujú na cene daného zariadenia, a preto bude pri konštrukcii goniofotometra použitý senzor **TSL2561**, ktorý vďaka svojej konštrukcii vyniká väčšou variabilitou.

Na záver treba podotknúť, že spoločné charakteristiky svetelných senzorov **BH1750**, **TSL2561**, **OPT3001** a existencia nadefinovaných knižníc, umožňuje veľmi jednoduchú výmenu jednotlivých senzorov tvoriacich sensorický systém goniofotometra. Napríklad v prípade, že by sa nám podarilo zakúpiť senzor **OPT3001**, je možná jeho zámena za aktuálne vybraný senzor **TSL2561**, pričom by sa táto zámena prejavila len minimálne na schéme zapojenia goniofotometra, a taktiež v programe, ktorý sa nahráva do pamäte dosky Arduino Uno. Celý princíp softvérovej konfigurácie, v prípade výmeny senzorov, by spočíval vo vytvorení nového objektu zapojeného senzora a následnému použitiu odpovedajúcej funkcie na zaznamenanie hodnoty intenzity osvetlenia, dostupnej z príslušnej nainportovanej externej knižnice. Zaznamenaná hodnota by sa následne preposielala do programu používateľského rozhrania.

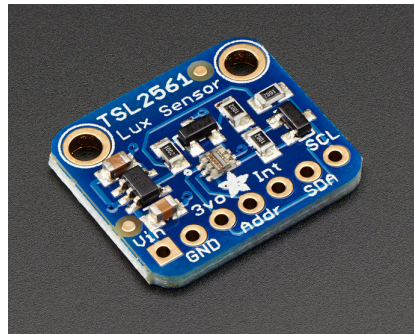
Tab. 7.2: Prehľad parametrov vzorky svetelných senzorov

Senzor	TEMT6000	BH1750	TSL2561	OPT3001
Typ	Fototranzistor	Fotodióda	2 x Fotodióda	Fotodióda
Napájanie	5V	2,4-3,6 V	2,7-3,6V	1,6-3,6V
Rozsah	-	1 - 65535 Lux	0,1 - 40000 Lux	0,01 - 83000 Lux
Max. citlivosť	-	1 Lux	1 Lux	0,01
Komunikácia	Analógový signál	$I^2C$	$I^2C$	$I^2C$
Cena	58 CZK	68 CZK	298,87 CZK	408,16 CZK

## 7.2.2 Senzor TSL2561

Fotometrický senzor **TSL2561** zobrazený na obr. 7.2 je digitálny senzor žiarenia, ktorý vyniká svojou variabilitou a použiteľnosťou, v prípade rozličných svetelných podmienok. Senzor pozostáva z dvoch zabudovaných diód, a to konkrétne infračervenej, schopnej zachytiť infračervené žiarenie a celospektrálnej, ktorá zachytáva žiarenie svetelného spektra v pásme infračerveného, až po začiatok ultrafialového žiarenia. Prítomnosť dvoch separovane oddelených diód umožňuje sprostredkovať meranie žiarenia v rámci vymedzeného spektra, avšak umožňuje aj oddelené meranie infračerveného žiarenia, ako aj žiarenia viditeľného ľudským okom, teda žiarenia nachádzajúceho sa v rozmedzí spektrálnej citlivosti ľudského oka. Medzi ďalšie výhody predstaveného senzora patrí tiež schopnosť zachytiť pomerne veľký dynamický

svetelný rozsah, a to od 0.1, až po hodnotu 40 000 luxov, a zabudovaný analógovo-digitálny prevodník (ADC), čo umožňuje funkčné a efektívne zapojenie senzora s mikrokontrolerom v prípade, že doska s mikrokontrolerom nedisponuje analógovými vstupmi. Výhodná je aj pomerne nízka hodnota napájacieho prúdu 0.5mA v prípade aktívneho režimu senzora, teda režimu v ktorom senzor odosiela namerané dáta. Senzor je teda možné napájať priamo prostredníctvom napájacích pinov Arduina[19].



Obr. 7.2: **TSL2561** - fotosenzor použitý na zachytenie hodnôt intenzity osvetlenia svetelného zdroja[19]

### 7.2.3 Zbernica $I^2C$

Príslušný fotosenzor TSL2561 komunikuje s Arduino prostredníctvom zbernice  $I^2C$ .

Uvedená zbernica bola vyvinutá firmou *Philips* začiatkom osemdesiatych rokov minulého storočia, a stala sa pomerne populárnou možnosťou prepojenia elektronických periférií s mikrokontrolerom. Je založená na **MASTER-SLAVE** architektúre, pričom možnosť pripojenia veľkého množstva periférnych zariadení je umožnená prostredníctvom špeciálnych adres, ktorými jednotlivé zariadenia disponujú[20].

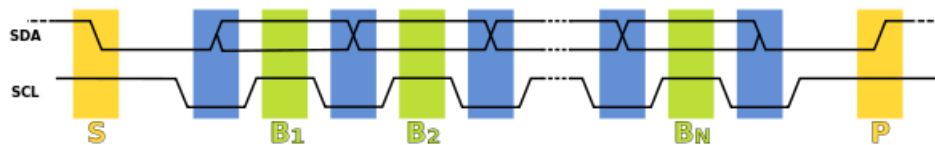
Prepojenie jednotlivých komponentov je realizované prostredníctvom dvoch vodičov, konkrétne **SDA** vodičom, ktorý je tzv. dátový vodič slúžiaci na prenos dát a **SCL** vodičom, ktorý prenáša hodnotu hodinového signálu[15].

V závislosti na architektúre zbernice je možné vzájomne prepojiť zariadenie typu **MASTER** s vedľajšími periférnymi zariadeniami typu **SLAVE**, v tomto prípade hovoríme o single-master zbernici, respektíve je možné prepojiť viac zariadení typu **MASTER**, pričom v tomto prípade sa jedná o tzv. multi-master zbernicu[20].

Zariadenie **MASTER** generuje hodinový signál a riadi prenos dát. Komunikácia je zahájená prostredníctvom tzv. **START** podmienky, za ktorou bezprostredne nasleduje preposlanie sedem bitovej adresy zariadenia, s ktorým sa **MASTER** snaží komunikovať a jeden R/W bit, ktorý špecifikuje príslušnú vyžadovanú operáciu. V

prípade, ak je **R/W** bit nastavený na hodnotu log. 0, **MASTER** odosiela (zapisuje) dáta do zariadenia, a recipročne ak je R/W bit nastavený na hodnotu log. 1, **MASTER** od zariadenia dáta prijíma (číta). Následne po preposlaní uvedených bitov, jednotlivé periférie vyhodnocujú preposlanú sedem bitovú adresu, a v prípade zhody odošlú potvrdzovací bit (**ACK**). Po preposlaní potvrdzovacieho bitu nasleduje operácia vymedzená **R/W** bitom[20].

Pri procese výmeny dát medzi zariadením **MASTER** a vybraným **SLAVE** zariadením, dochádza k odosielanie dátových bitov, pričom za každou skupinou ôsmich dátových bitov nasleduje potvrdzovací bit, ktorým zariadenie indikuje správnosť prijatých dát. V prípade, ak sa toto nestane a potvrdzovací bit má úroveň log. 1 (**NACK** "not acknowledgement") na linke **SDA**, dochádza buď k prerušeniu komunikácie prostredníctvom toho, že **MASTER** odošle **STOP** príkaz, alebo k opakovanému odoslaniu **START** príkazu, čo vynúti opakovanie procesu výmeny dát medzi zariadením **MASTER** a vybraným zariadením **SLAVE**[15].



Obr. 7.3: Sekvencia prenosu dát: S - start bit, P - stop bit,  $B_N$  - dátové bity[20]

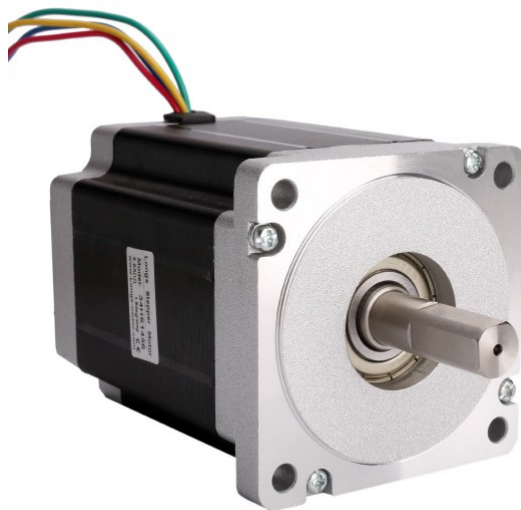
## 7.3 Motor Nema

Druhou najdôležitejšou súčasťou prístroja, hneď po doske Arduino Uno, ktorá tvorí obrazný mozog zariadenie, je sada motorov Nema 34 ("National Electrical Manufacturers Association"), ktoré zabezpečujú otáčanie svetelného zdroja, a teda tvoria akési hypotetické svaly zariadenia.

Jedná sa o hybridný bipolárny krokový motor, určený prevažne na konštrukciu CNC strojov, robotických manipulátorov, či 3D tlačiarňí. Hybridné motory vynikajú svojimi momentovými a dynamickými charakteristikami, a z toho dôvodu sú v súčasnej dobe aplikačne najrozšírenejšie, a najpoužívanéjšie v rámci bežného priemyslu[22].

Motory boli vybrané z ohľadom na neoficiálne nároky kladené na konštruovaný prístroj goniofotometra, ktorý má umožňovať meranie parametrov veľkých svetelných zdrojov a svietidiel s hmotnosťou niekoľkých kilogramov. Vybrané motory Nema sprostredkúvajú dostatočný silový moment, ktorý je potrebný na manipuláciu takýchto robustných svetelných zdrojov, ako aj silový moment, ktorý ich v

priebehu procesu meranie stabilizuje na určitom mieste, po dobu odčítania a prepriestrelania hodnoty, ktorá je nameraná prístrojom. K ďalším podstatným faktorom sa radí dostupnosť a cena uvedených motorov.



Obr. 7.4: Nema 34: motor použitý pri stavbe goniofotometra[22]

Tab. 7.3: Parametre motora Nema 34[22]

Parameter	Hodnota
Veľkosť kroku motora	$1.8 \pm 5\%$
Napájacie napätie	3.08V
Maximálny napájací prúd	5.6A/fázu
Počet fázý	2
Hodnota odporu	$0.55 \pm 10\% \Omega/\text{fázu}$
Hodnota fixačného momentu	$840 N.cm$
Hodnota momentu rotora	$2900 g.cm_2$
Hmotnosť	3.8 Kg

## 7.4 M542 motor driver

Veľké a stredne veľké krokové motory, ku ktorým Nema 34 nepochybne patrí, nie je možné napájať len prúdom, ktorý je prítomný na výstupnom napájacom pine, ktoré dosky Arduino bežne poskytujú. Z uvedeného dôvodu sa na napájanie krokových motorov používajú tzv. *Motor Drivers*, ktoré poskytujú dostatočne veľký napájací prúd, potrebný na napájanie krokového motora, tak aby umožnili jeho správnu činnosť. V tomto konkrétnom prípade je takýmto zariadením Driver **M542**, ktorý je napájaný externým zdrojom jednosmerného napätia o veľkosti 24V, pričom ten je napájaný zo štandardnej elektrickej siete. Driver **M542** na obr. 7.5 predstavuje vysoko účinné zariadenie umožňujúce napájanie krokových motorov rozličného typu a veľkosti, primárne však dvojfázových, a štvorfázových hybridných krokových motorov[23].

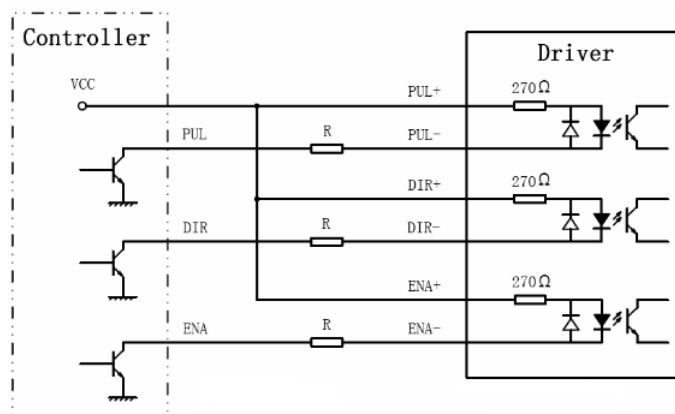


Obr. 7.5: M542 motor driver potrebný na napájanie, ako aj ovládanie krokových motorov[23]

Driver M542 disponuje celkom dvanástimi vstupmi, pričom jedna polovica, teda šesť vstupov na obr. 7.5 zobrazených dole, predstavuje vstupy zodpovedné za napájanie krokového motora. K týmto "napájacím" vstupom radíme vstupy +V, GND a vstupy slúžiace na zapojenie oboch vinutí krokového motora **A+**, **A-**, **B+**, **B-**. Sekundárnu skupinu šiestich vstupov na obr. 7.5 situovaných hore, tvoria vstupy na napojenie signálov, ktoré sprostredkúva logická jednotka, v tomto prípade sa jedná o prepojenie uvedených horných vstupov M542 s doskou Arduino Uno. K týmto "signálovým" pinom patria konkrétne dvojice vstupov **PUL+**, **PUL-**, **DIR+**, **DIR-**, a v neposlednom rade **ENA+**, **ENA-**[23].

Obrázok 7.6 popisuje možnosť zapojenia M542 s jednotlivými pinmi mikrokontrolera. Pri konštrukcii vlastného prístroja vychádzam z tejto schémy, avšak zapojenie je mierne modifikované. Primárny rozdiel zapojenia spočíva v nezapojení vstupov





Obr. 7.6: Typické zapojenie M542 s mikrokontrolerom[23]

ENA+, ENA-, ktoré slúžia v podstate na povolenie chodu krokového motora. V prípade, že tieto piny nie sú zapojené, ostáva krokový motor permanentne v režime ENABLE[23].

Okrem uvedených vstupov sa na bočnej strane M542 nachádza sada prepínačov, ktoré poskytujú možnosť úpravy veľkosti napájacieho prúdu motora a prepínače, ktoré slúžia na nastavenie parametra tzv. mikrokrokovania (Microstepping). Režim mikrokrokovania je zaujímavý tým, že sa v tomto prípade pri krokovaní motora inicializujú všetky vinutia, avšak z rozdielnym výkonom, čo umožňuje rotoru motora pohybovať sa vo výrazne menších uhloch, ako by to bolo možné v prípade postupnej striedavej inicializácie jednotlivých vinutí motora[23].

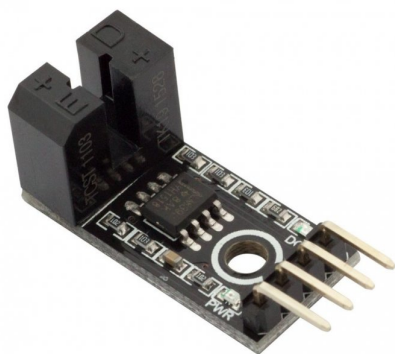


Obr. 7.7: Znáznornenie rozloženia vstupov a prepínačov M542[23]

## 7.5 Infračervené optické senzory

Na signalizáciu a nastavenie počiatočnej polohy použitých motorov, boli použité infračervené senzory optickej závery ("RobotDyn Optocupler") viditeľné na obr. 7.8. Nutnosť použitia je zjavne z dôvodu neschopnosti motorov určiť správnu počiatočnú polohu, na začiatku meracieho procesu. Sensory, ktorými je zariadenie vybavené, pozostávajú s emitora infračerveného žiarenia a detektora tohto žiarenia. Emitor a detektor sú umiestnené tak, aby žiarenie vyžarované emitorm dopadalo na aktívnu časť detektora, v prípade korektného zapojenia pinov senzora so vstupno/výstupnými pinmi Arduina, je možné detekovať existenciu, či neexistenciu prekážky v ceste medzi emitorm, a detektorom uvedeného senzora[24].

Kedže navrhovaný goniofotometer pozostáva z dvoch motorov umožňujúcich rotáciu svetelného zdroja v rámci C- $\gamma$  fotometrických rovín, je nutné vybaviť zariadenie párom uvedených senzorov.



Obr. 7.8: RobotDyn Optocupler: infračervený senzor použitý v procese nastavenia počiatočnej polohy motorov[24]

## 8 Softvér zariadenia

Primárnym cieľom diplomovej práce je vytvorenie goniofotometra, a zároveň vytvorenie používateľského rozhrania, ktoré by umožňovalo používateľovi vykonať meranie priestorového rozloženia svietivosti rôznych svetelných zdrojov. Používateľské rozhranie zariadenia musí následne zaznamenané hodnoty svietivosti, sprostredkované svetelným senzorom, vizualizovať formou tabuľky, ako aj prostredníctvom grafického zobrazenia.

Úvodom je možné softvér zariadenia rozdeliť na dve separátne časti, a to konkrétne na program, ktorý je nahraný v pamäti dosky Arduino Uno, a na program grafického používateľského rozhrania, ktoré meranie inicializuje, následne ukladá, a vizualizuje namerané výsledky svietivosti svetelného zdroja, poprípade svietidla.

### 8.1 Arduino IDE - vývojový softvér

Programovanie dosiek Arduino je pomerne jednoduché, a prebieha v integrovanom vývojovom prostredí (Arduino IDE), ktoré je možné stiahnuť na oficiálnych stránkach *ardiono.cc* v sekcii *software*. Arduino IDE je naprogramované v programovacom jazyku Java, pričom obsahuje veľké množstvo knižníc, ktoré do značnej miery uľahčujú písanie kódu v tomto prostredí.

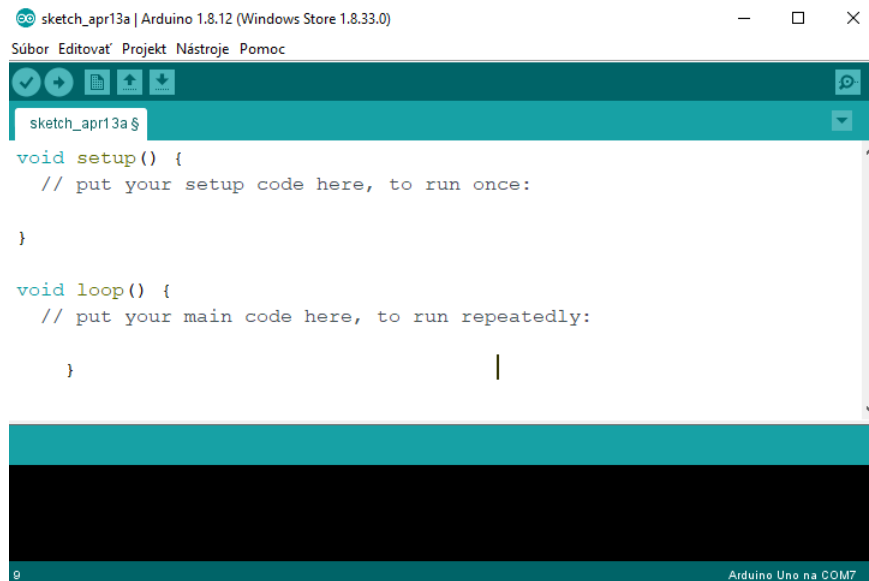
Samotnú dosku Arduino UNO je možné programovať v období jazyka C/C++, čo predstavuje veľkú výhodu, keďže sa jedná o jazyk, ktorý je v súčasnosti síce v úzadí vyšších, abstraktnejších programovacích jazykov, avšak stále patrí do triedy najrozšírenejších programovacích jazykov, s ktorými sa môžeme stretnúť, a ktoré sa vyučujú bežne na technických vysokých školách[15].

Obrázok 8.1 zobrazuje okno vývojového rozhrania bezprostredne po založení nového projektu. Rozhranie poskytuje množstvo funkcií, z ktorých za zmienku stoja hlavne možnosť výberu použitého typu dosky Arduino, sériový monitor určený na vizualizáciu dát preposielaných po sériovej linke a možnosť špecifikácie použitého sériového portu.

Ako priložený obrázok znázorňuje, po založení nového projektu sa nám automaticky vygeneruje tzv. sketch, ktorý obsahuje dve funkcie, poprípade bloky, *setup()* a *loop()*.

Funkcia *setup()* v drvivej väčšine prípadov obsahuje kód pre inicializáciu periférií, či už sa jedná o pripojenú senzoriku alebo inicializáciu, a spustenie sériovej komunikácie. Je nutné si uvedomiť, že kód nachádzajúci sa v tejto funkcii sa vykoná len jedenkrát, a to bezprostredne po nahratí kódu do pamäte dosky Arduino.

Druhá uvedená funkcia *loop()* je od funkcie *setup()* značne odlišná. Ako názov napovedá, kód umiestnený v tejto funkcii sa pravidelne opakuje, vo všeobecnosti



Obr. 8.1: Okno integrovaného vývojového prostredia (Arduino IDE)

neobmedzenú dobu, pokiaľ je prítomné napájacie napätie.

Je dôležité uviesť, že uvedené funkcie musia byť prítomné v každom programe, ktorý sa následne nahráva do vývojovej dosky. V prípade, že by sme uvedené funkcie úmyselne zmazali, program by nebolo možné nahráť do pamäte Arduino[15].

## 8.2 Program určený pre Arduino UNO

Program určený k nahratiu na dosku Arduino je napísaný vo vývojovom prostredí Arduino IDE, ktoré je popísané v predchádzajúcej podkapitole. Samotný program pozostáva z niekoľkých súborov, konkrétne z **motory.h**, **motory.cpp**, hlavného súboru **ArduinoGoniofotometer.ino** a priloženej knižnice **Adafruit**, ktorá obsahuje funkcie určené na inicializáciu, a ovládanie fotosenzora.

S prihliadnutím na fakt, že program, ktorý slúži na ovládanie hardvéru zariadenia skrz príkazy preposielané z programu používateľského rozhrania, nie je nijak zložitý, je vhodné ho obsiahnejšie popísať.

### **motory.h, motory.cpp**

Uvedené súbory obsahujú deklaráciu triedy *MOTOR*, spolu s jej premennými, funkciami a konštantami, ktoré sa uplatňujú v procese nastavovania motorov, ale aj pridruženej senzoriky, zodpovednej za určenie počiatočnej polohy oboch motorov, a ktoré sa vyskytujú následne v hlavnej časti programu určeného pre Arduino.

Priložená ilustrácia 8.2 v sebe združujú informácie o premenných a funkciách, ktoré sú zadeklarované v súbore **motory.h**. Uvedené premenné sa následne v súbore **motory.cpp** uplatňujú v procese špecifikácie parametrov a správania jednotlivých funkcií, ako aj konštruktora uvedenej triedy. Konštruktor, spolu s funkciami uvedenej triedy, majú následne veľký význam neskôr v hlavnej časti programu, kde prostredníctvom objektu tejto triedy ovládame inicializáciu a krokovanie jednotlivých krokových motorov, v procese merania, v prípade, že je zariadenie aktívne.

<i>MOTOR</i>	<i>MOTOR</i>
<pre> +MOTOR() +Cplane_MotorInit(): void +Gamma_MotorInit(): void +getEndOf_MeasurementProcess(): boolean +find_refPosition_C_Motor(): boolean +find_refPosition_Gamma_Motor(): boolean +moveGammaMotor(): void +gammaMotor_Move(): boolean +cMotor_Move(): boolean +setGammaMove (boolean flag): void +setCplaneMove(boolean flag): void +moveForCorrection(int stepM): void +get_stepCplane(): int +set_ref_Position_C_Motor(boolean flag): void +set_ref_Position_Gamma_Motor(boolean flag): void -void -moveCplaneMotor(): void -slowStepGamma(int dir, int steps): void -slowStepCplane(int dir, int steps): void </pre>	<pre> Stepper *Cplane_Motor Stepper *Gamma_Motor -GAMMA_INTERRUPTOR: int -C_PLANE_INTERRUPTOR: int -stepCplane: int -stepGamma: int -gamma_Direction: int -cPlane_Direction: int -gammaStepValue: int -cPlaneStepValue: int -endMeasurementFlag: boolean -cMove: boolean -gammaMove: boolean -ref_Position_C_Motor: boolean -ref_Position_Gamma_Motor: boolean </pre>

Obr. 8.2: Diagram zobrazujúci všetky premenné a funkcie, ktoré patria triede *MOTOR*.

## ArduinoGoniofotometer.ino

Hlavná časť programu je obsiahnutá v súbore **ArduinoGoniofotometer.ino**, práve tu sa nachádzajú základné funkcie *loop()* a *setup()*, definície stavov zariadenia, vytvorenie príslušných objektov triedy *MOTOR*, ale aj triedy *TSL2561*, ktoré sú následne použité k zaznamenávaniu konkrétnych hodnôt v procese určovania vyžarovacej charakteristiky daného svietidla.

Úvodom sú opäť nadefinované konštanty, ktoré popisujú dva základné stavy prístroja, a to stav **DEVICE\_MEASUREMENT** a **DEVICE\_NO\_MEASUREMENT**, ktoré určujú kedy je zariadenie v tzv. aktívnom alebo naopak v pasívnom stave. V aktívnom stave prebieha proces vyhľadania referenčnej polohy oboch

motorov, meranie, proces krokovania motorov a preposielania hodnôt zo senzora, prostredníctvom sériovej linky do počítača, kde sa nachádza ovládací, a vizualizačný program. V prípade pasívneho stavu je goniofotometer v stave pokoja, kedy v podstate zariadenie nie je aktívne, a zostáva neaktívne, až do príchodu aktivačného príkazu **START** preposlaného z programu v PC.

Vráťme sa ešte k funkciám *setup()* a *loop()*. V tomto konkrétnom prípade je kód obsiahnutý vo funkcii *setup()* jednoduchý, a v prvom rade slúži na inicializáciu potrebných periférií určených hlavne na prenos údajov. Funkcia *setup()* obsahuje časť kódu, ktorý je zodpovedný za spustenie, nastavenie sériovej komunikácie (*Serial.begin()*), spustenie obojsmernej zbernice  $I^2C$  (*Wire.begin()*), ktorá sprostredkúva komunikáciu medzi pinmi Arduina a fotosenzorom, ako aj funkciu, ktorá inicializuje, nastavuje parametre použitého senzora (*senzor\_Inicialisation()*).

```
void setup() {  
    Serial.begin(9600);  
    Wire.begin();  
    senzor_Inicialisation();  
}
```

Obr. 8.3: Funkcia *setup()* inicializujúca komunikáciu a senzor.

Funkcia *loop()* je o niečo zaujímavejšia, a to z toho dôvodu, že v tomto bode programu sa na základe dát, ktoré boli preposlané cez sériovú linku, rozhoduje o aktivácii jedného z prítomných stavov. Vzhľadom na aktuálny aktívny stav, zariadenie vykonáva vymedzenú funkciu.

```
void loop() {  
    if (device_Routine.equalsIgnoreCase(DEVICE_MEASUREMENT)) {  
        measurement_Process();  
    } else{  
        device_Routine = DEVICE_NO_MEASUREMENT;  
        Serial.print(END_MEASUREMENT);  
        Serial.print(SEPARATOR);  
    }  
}
```

Obr. 8.4: Funkcia *void loop()*, výber príslušného stavu zariadenia v závislosti na príkaze z používateľského rozhrania.

## Príkazy a priebeh meracej sekvencie

Zariadenie medzi zmienenými základnými stavmi, ktoré následne konkretizujú činnosť, ktorú goniofotometer vykonáva, prechádza na základe už do malej miery popísaných príkazov, ktoré sú zadefinované v podobe konštánt hneď za definíciou oboch stavov. Zadefinovanie stavov, príkazov a počiatočného stavu zariadenia, demonštruje obr. 8.5. Okrem uvedenej deklarácie konštánt je dobré si povšimnúť aj vytvorenie objektov dvoch tried, a to triedy *MOTOR* a triedy *TSL2561*. Vytvorené objekty nám umožňujú pristupovať k funkciám, poprípade premenným, ktoré sú zadeklarované v príslušných triedach. Zadefinovanie týchto objektov je kľúčové, pričom zadefinované objekty sa budú uplatňovať prevažne v stave, v ktorom je zariadenie aktívne, teda v stave **DEVICE\_MEASUREMENT**.

```
#define DEVICE_MEASUREMENT "MEASUREMENT"
#define DEVICE_NO_MEASUREMENT "NOMEASUREMENT"
String device_Routine = DEVICE_NO_MEASUREMENT;
MOTOR motor;
Adafruit_TSL2561_Unified tsl = Adafruit_TSL2561_Unified(TSL2561_ADDR_FLOAT, 12345);
const String START_BUTTON = "START";
const String STOP_BUTTON = "STOP";
const String END_MEASUREMENT = "END";
const String DEVICE_ANSWEAR = "ANSOK";
const String SEPARATOR = ",";
const String NEW_PLANE = "C";
```

Obr. 8.5: Zadefinovanie základných stavov a konštánt

Program goniofotometra, hneď po inicializácii a nastavení komunikácie medzi používateľským rozhraním, ale aj pripojenou perifériou v podobe optického senzora, následne vo východnom stave **DEVICE\_NO\_MEASUREMENT** "čaká" na príslušné príkazy, ktoré používateľ môže odoslať prostredníctvom používateľského rozhrania.

Ak sa používateľ rozhodne po sériovej linke odoslať dáta, zariadenie prostredníctvom funkcie *serialEvent()* tieto dáta vyhodnocuje a interpretuje. Uvedená funkcia vyhodnocuje v podstate príkazy v podobe reťazcov a v prípade, že sa príkazy rovnajú s preddefinovanými konštantami viz. obr. 8.5, rozhoduje o výbere aktuálneho stavu zariadenia. Používateľ môže prostredníctvom používateľského rozhrania preposlať v zásade dva príkazy, a to **START** a **STOP**, ktorých funkcia je pravdepodobne jasná. Príkaz **START** spustí aktívny stav zariadenia tzn. **DEVICE\_MEASUREMENT**, a recipročne príkaz **STOP** spúšťa stav pasívny tzn. **DEVICE\_NO\_MEASUREMENT**.

Po príchode aktivačného príkazu **START**, a jeho rozpoznaní, nasleduje inicializácia motorov, senzora, a vyhľadávanie referenčných polôh oboch motorov, prostredníctvom funkcií, ktoré boli zadefinované v triede *MOTOR*, respektíve v triede

*TSL2561*, ktorá riadi a inicializuje prítomný senzor. V prípade, že sú motory a senzor inicializované, a v referenčnej polohe, zariadenie odošle potvrdzujúci reťazec, ktorý indikuje pripravenosť zariadenia na meranie, pričom prechádza do stavu **DEVICE\_MEASUREMENT**, kde prostredníctvom funkcie *measurement\_Process()* realizuje proces merania, ktorý následne prebieha, až kým sa nevykoná celá kroková sekvencia motorov, respektíve, kým sa používateľ sám nerozhodne proces merania zastaviť prostredníctvom príkazu **STOP**, ktorý goniofotometer privedie opäť do pasívneho stavu.

## 8.3 Rozbor kódu používateľského rozhrania

Predchádzajúca kapitola bola zameraná na opis programu, ktorý je nahratý v pamäti dosky Arduino Uno, a ktorý slúži na ovládanie aktívnych súčastí zariadenia, akými sú napr. krokové motory. Táto kapitola bude venovaná programu, ktorý tvorí používateľské rozhranie ovládajúce prostredníctvom príkazov proces merania, a zároveň proces ukladania a vizualizácie výsledkov merania.

### 8.3.1 Programovací jazyk Java

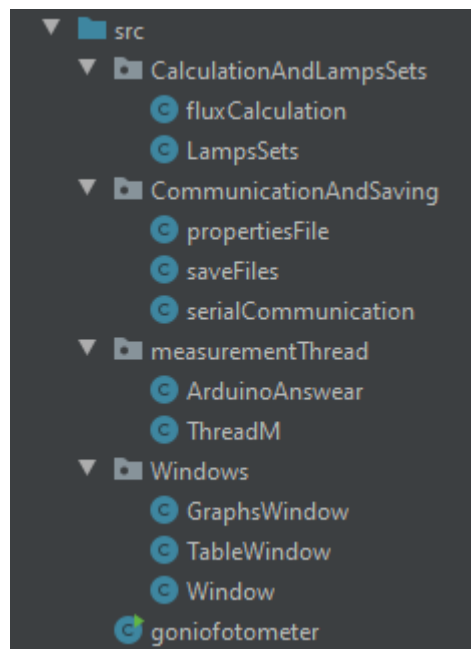
Programovací jazyk Java patrí medzi tzv. objektovo orientované programovacie jazyky, pričom v minulosti predstavoval jeden s najobľúbenejších a hojne aplikačne používaných programovacích jazykov, hlavne kvôli svojej hardvérovej univerzalite, a pomerne rozsiahlym knižniciam, ktoré uľahčujú proces vývoja softvéru v tomto jazyku. V súčasnej dobe Java ako programovací jazyk súperí s podobnými vysoko abstraktnými objektovo orientovanými jazykmi, akými sú napríklad Python či JavaScript.

Objektovo orientované programovanie je programátorská paradigma, ktorá sa začala uplatňovať koncom 20. storočia. Táto programátorská technika je založená na tvorbe objektov, ktoré disponujú určitými vlastnosťami a funkciami, teda činnosťami, ktoré môže objekt vykonávať. Objektové programovanie má obrovskú výhodu v tom, že program môžeme rozčleniť na súbor samostatných objektov, ktoré spolu môžu komunikovať. Výhoda spočíva vo väčšej prehľadnosti v prípade rozsiahlych programov, a zároveň, keďže sa jedná o autonómne celky, je možné jednotlivé triedy určené na vytvorenie objektov opätovne použiť v prípade návrhu odlišného softvéru. Java poskytuje funkcionality, ako dedičnosť, polymorfizmus, zapuzdrenie, ako aj platformu Java Swing, ktorá umožňuje pomerne jednoduchú tvorbu grafického používateľského rozhrania.

Vzhľadom na popísané parametre, bol práve tento programovací jazyk jasným kandidátom na vytvorenie obrazového používateľského rozhrania goniofotometra.



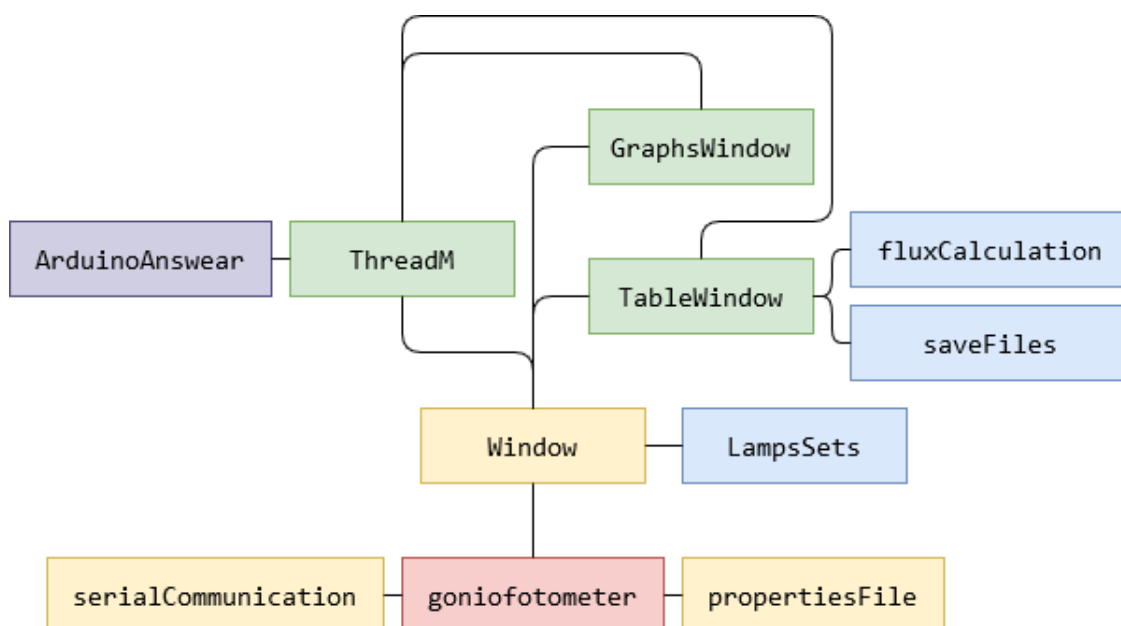
## 8.4 Štruktúra programu



Obr. 8.6: Štruktúra (balíčky, triedy) používateľského rozhrania

Štruktúra programu používateľského rozhrania je znázornená na obr. 8.6. Na tomto znázornení si môžeme povšimnúť, že program pozostáva z troch separátnych balíkov (packages), pričom jednotlivé balíky disponujú rozdielnym počtom tried (classes). Triedy sú do konkrétnych balíkov radené v závislosti na svojom prepojení a charaktere. Celkovo sa v programe nachádza jedenásť nadefinovaných tried, avšak v programe sa uplatňuje množstvo tried, ktoré sú podporované samotnou internou knižnicou, ktorá je súčasťou Javy, respektíve inými externými knižnicami.

Hlavnou triedou je v tomto prípade trieda *goniofotometer*, ktorá obsahuje funkciu *main*, ako aj deklaráciu objektov (inštancií) základných tried, ktoré sú súčasťou objektového modelu programu. Spolu s objektmi tu prebieha zadefinovanie používateľských nastavení, ktoré sú podstatné ďalej v procese merania, a uplatňujú sa v prípade, ak sú súbory, ktoré uchovávajú parametre merania poškodené alebo neexistujú. Parametre, ako veľkosť uhlov natočenia krokových motorov, ale aj vlastnosti meraného svetelného zdroja sa uchovávajú v samostatných textových súboroch, z ktorých je následne možné "vytiahnuť" požadované informácie týkajúce sa meracieho procesu v prípade, že je to nevyhnutné.



Obr. 8.7: Vzájomné prepojenie tried v objektovom modeli.

### 8.4.1 Package CalculationAndLampsSets

Prvý balík v štruktúre programu **CalculationAndLampsSets** obsahuje doplnkové triedy, ktoré zabezpečujú správne uloženie súboru vo formáte **.ldt**, ako aj algoritmus na výpočet svetelného toku zdroja, ktorý je predmetom nášho skúmania.

#### Trieda *fluxCalculation*

Trieda umožňuje určiť hodnotu svetelného toku svetelného zdroja. Princíp výpočtu spočíva v implementácii metódy určenia pásmových tokov  $\Delta\Phi_i$  v jednotlivých C-rovinách, a to súčinom hodnoty svietivosti a konkrétneho priestorového uhla, ktorý pripadá tejto svietivosti. Jednotlivé dielčie hodnoty svetelného toku sa sčítajú, a tak sa určí hodnota toku prislúchajúceho konkrétnej C-rovine. V prípade, ak dokážeme vypočítať svetelné toky všetkých vybraných C-rovín, aktívnych v procese merania, celkový svetelný tok potom určíme, ako súčet podielov spomínaných svetelných tokov a veľkosti konkrétnej C-roviny. Bližšie informácie v podkapitolách 5.2.3 *Meranie svetelného toku svietidla početnou metódou* a 5.2.3 *Určenie svetelného toku  $\Phi$  metódou pásmových tokov*.

#### Trieda *LampsSets*

Jedná sa o pomocnú triedu, ktorá sprostredkúva správnosť uloženia údajov, o skúmanom zdroji svetla, vo formáte **.ldt**. Trieda vytvára list použitých svetelných zdrojov spolu s hodnotami parametrov, ako teplotná chromatičnosť atď..

## 8.4.2 Package CommunicationAndSaving

Balík **CommunicationAndSaving** obsahuje triedy, ktoré sú zodpovedné za ukladanie parametrov a nastavení, týkajúcich sa meracieho procesu, ako aj ukladania výsledkov z jednotlivých meraní, a triedu zodpovednú za komunikáciu medzi programom používateľského rozhrania, a programom samotného prístroja.

### Trieda *propertiesFile*

Trieda zodpovedná za ukladanie nastavení. Nastavenia, ktoré používateľ vpíše do špecifických textových polí, ktoré sú súčasťou používateľského rozhrania, je možné uložiť prostredníctvom vybraných tlačidiel rozhrania. Trieda *propertiesFile* je tzv. singleton trieda, čo v praxi znamená, že množstvo inštancií, ktoré je možné skrz túto triedu vytvoriť, je obmedzené na jednu. Trieda singleton sa v tomto prípade uplatňuje z podstatného dôvodu, a to kvôli jednotnosti používateľských nastavení v triedach, ktoré čerpajú parametre pre svoju činnosť práve z inštalácie triedy *propertiesFile*.

Trieda obsahuje funkcie umožňujúce uložiť textové súbory s príslušným zoznamom parametrov, ich spätné načítanie, nastavenie, či prenastavenie na pôvodnú úroveň.

### Trieda *saveFiles*

Trieda, ktorá sa uplatňuje výhradne v spolupráci s objektom triedy *TableWindow*, pričom je zodpovedná za vytvorenie objektov umožňujúcich ukladanie hodnôt merania, a to konkrétne v dvoch formátoch, **.csv** (Comma-separated values) a **.ldt** (Eulumdat).

Obsahuje, okrem konštruktorov, ktoré špecifikujú formát ukladateľného dokumentu, taktiež funkcie na zápis a oddelenie jednotlivých hodnôt, parametrov, ktoré si užívateľ praje uložiť.

### Trieda *serialCommunication*

Uvedená trieda sprostredkúva komunikáciu medzi samotným zariadením goniofotometra a programom používateľského rozhrania. Využíva externú knižnicu **jSerialComm**, ktorá jej umožňuje vytvoriť objekt *SerialPort* prístupujúci k funkciám, ako napr. *getCommPorts*, ktorá vracia list sériových portov, aktívnych v danom zariadení.

Trieda samozrejme obsahuje nadefinované funkcie, ktoré zodpovedajú za naviazanie komunikácie, teda otvorenia portu, preposlanie a prijatie dát, identifikáciu

použitého portu, a samozrejme funkciu, ktorá komunikačný port uzatvorí, a tým preruší komunikáciu.

Trieda sa uplatňuje hlavne vo vlákne merania, v ktorom používateľ posiela aktívne príkazy do Arduina, a v ktorom prebieha hromadenie hodnôt, zo senzora, ktoré Arduino preposiela.

### 8.4.3 Package **measurementThread**

Balík **measurementThread** obsahuje triedy, ktoré po inicializácii vykonávajú meranie. Prostredníctvom tu prítomných tried dochádza k odoslaniu štartovacieho príkazu, následne prebieha potvrdenie odoslania a cyklus merania, až do doby, kým nedôjde kód implementovaný vo vývojovej doske Arduino do svojho konca, alebo nie je používateľom merací proces ukončený.

#### **Trieda *ThreadM***

*ThreadM* vytvára vlákno merania, ktoré spúšťa proces merania, a následne píjima a ukladá dáta generované senzorom, ktoré preposiela Arduino skrz sériovú linku. Trieda "dedí" vlastnosti z internej Java triedy *JThread*. V prípade dedenia z triedy *JThread* je nutné implementovať funkcie *start()* a *run()*, ktoré vlákno aktivujú. Po vytvorení objektu tejto triedy, a volaní konštruktora, je spustená funkcia *startThread()*, ktorá vykoná nastavenie meracej obrazovky, a deaktivuje možnosť používania tlačidiel používateľského rozhrania, načo prechádza do funkcie *start()*, ktorá volá funkciu *run()*, obsahujúcu algoritmus samotného meracieho procesu.

Vo funkcii *run()* je následne spustená komunikácia, medzi zariadeniami, a preposlanie aktívneho príkazu **START**. Po úspešnom odslaní aktívneho príkazu nasleduje čakanie na odpoveď z Arduina, ktoré oznamuje pripravenosť zariadenia na meranie. Odpoveď je sprostredkovaná prostredníctvom ďalšej triedy *ArudinoAnswer*, ktorá je súčasťou totožného balíka. Po získaní odpovede, o pripravenosti zariadenia, môže merací proces pokračovať a zaznamenať dáta z Arduina prostredníctvom reťazca, ktorý je opatrený tzv. separačnými znakmi, umožňujúcimi jeho následné roztriedenie, a zaradenie podľa jednotlivých C-rovín, v ktorých meranie prebiehalo.

#### **Trieda *ArudinoAnswer***

V prípade funkcie *run()* sa v triede *ThreadM* odosiela prostredníctvom sériovej linky príkaz v podobe reťazca **START**. V priebehu programu sa následne čaká na potvrdzovaciu správu zo zariadenia Arduino, ktoré recipročne odosiela správu v podobe

ďalšieho reťazca **ANSOK**. Túto správu je nutné zachytiť po príchode dát prúdiacich skrz sériovú linku. Práve kvôli tomuto problému vznikla trieda *ArudinoAnswear*.

Uvedená trieda číta prichádzajúce dáta, následne ich delí na základe separačného znaku, ktorý preposiela Arduino ako súčasť balíka dát. V tomto balíku dát sú zamiešané hodnoty osvetlenia zo senzora, separačný znak vymedzujúci začiatok novej C-roviny, reťazce ovplyvňujúce proces merania. Po oddelení jednotlivých prvkov sa tieto ukladajú do poľa reťazcov, a následne sa toto vzniknuté pole prechádza, a hľadá sa želaná odpoveď. V prípade, že je táto odpoveď nájdená, meranie pokračuje ďalej podľa scenára, ktorý určuje funkcia *run()*, ak však táto odpoveď nie je identifikovaná, a zároveň čítanie prebieha stanovenú dobu, ktorá je definovaná prostredníctvom inkrementačnej premennej, meranie sa automaticky zastaví a užívateľ je prostredníctvom textového poľa informovaný o neúspechu v procese inicializácie merania.

#### 8.4.4 Package Windows

Package **Windows** zodpovedá za grafické znázornenie používateľského okna a pridružených súčastí. Balík obsahuje tri triedy, *Window*, *TableWindow* a *GraphsWindow*.

Trieda *Window* je v tomto prípade primárna, tvoria sa v nej inštancie zvyšných tried umiestnených v tomto balíku, ako aj inštancia triedy, ktorá je zodpovedná za tvorbu vlákna meracieho procesu.

##### Trieda *Window*

Trieda *Window* je v programe pomerne špecifická, a to hlavne kvôli svojej rozsiahlosti a zložitosti. Obsahuje veľké množstvo premenných, funkcií a objektov, ktoré umožňujú vyskladanie používateľského okna, a hladký beh programu.

Keďže sa jedná v poradí o druhú najpodstatnejšiu triedu, mimo spomínanej inicializačnej triedy goniofotometer, je vhodný jej dôkladný rozbor.

Obr. 8.8 popisuje základné funkcie a vnútorné triedy, ktoré trieda obsahuje, mimo funkcií určených na vyčítanie textu z pridružených polí používateľského rozhrania.

- *Window(serialCommunication serial, propertiesFile properties, ArduinoAnswear answer)* - Java ako väčšina programovacích jazykov ponúka funkciu konštruktora, ktorý sa volá fakticky v čase vzniku objektu, teda v čase inicializácie triedy a vzniku inštancie. V prípade, ak v kóde nie je prítomný nami definovaný konštruktor, je automaticky volaný tzv. základný konštruktor, ktorý je prázdny. Trieda *Window* obsahuje, ako je možné vidieť na obr. 8.8 svoj vlastný konštruktor, ktorý plní značne dôležitú úlohu spočívajúcu v inicializácii premenných, ale hlavne objektov, akými sú prvky *JTextField*, *JMenuItem*, a mnoho ďalších. Rovnako preberá funkcionality z *JFrame* triedy, vďaka čomu môžeme toto okno zobraziť, nastaviť jeho základné

Window	Window
+Window(serialCommunication serial)	-startListener
-addUtilizationFactor(): void	-stopListener
-addMeasuremantPart(): void	-saveListener
-addGeneralPart(): void	-infoListener
-addLuminairePart(): void	-restoreListener
-addLampsPart(): void	-resultGraphsListener
+clickEnableFunction(boolean b): void	-resultTableListener
+show(String s): void	-closeListener
+clean(): void	-pathMenuItem
+getIllumQuestion(): boolean	-addSet
+getDistanceValue(): String	-deleteSet
	-deleteAll
	-closeProgram

Obr. 8.8: Diagram zobrazujúci funkcie a vnútorné triedy patriace triede Window.

vlastnosti, akými sú názov okna, veľkosť, či šírka konkrétneho vzniknutého okna. V konštruktoze triedy sa ďalej nachádzajú funkcie *addMeasurementPart()*, *addGeneralPart()*, *addLuminairePart()*, *addLampsPart()*, *addUtilizationFactor()*, ktoré sa podieľajú na inicializácii a skladaní okna. Je asi samozrejmé, že tieto funkcie nie sú v podstate potrebné, a kompletne celá inicializácia by mohla byť sprostredkovaná prostredníctvom konštruktoru, avšak rozdelenie prinesie väčšiu prehľadnosť, a v prípade, že by sa vyskytla v nejakom mieste "vykresľovania" chyba, táto by bola ľahšie detekovateľná.

- *addMeasurementPart()* - dopĺňa funkciu inicializácie (tvorby inštancií dôležitých objektov), a je zodpovedná za vykreslenie záložky používateľského okna *Measurement*,
- *addGeneralPart()* - dopĺňa funkciu inicializácie (tvorby inštancií dôležitých objektov), a je zodpovedná za vykreslenie záložky používateľského okna *General*,
- *addLuminairePart()* - dopĺňa funkciu inicializácie (tvorby inštancií dôležitých objektov), a je zodpovedná za vykreslenie záložky používateľského okna *Luminaire*,
- *addLampsPart()* - dopĺňa funkciu inicializácie (tvorby inštancií dôležitých objektov), a je zodpovedná za vykreslenie záložky používateľského okna *Lamps*.
- *addUtilizationFactor()* - dopĺňa funkciu inicializácie (tvorby inštancií dôležitých objektov), a je zodpovedná za vykreslenie záložky používateľského okna *Utilization Factors*.

Všetky vyššie popísané funkcie zodpovedajú za to, ako okno vyzerá, a aké obsahuje komponenty (JButton - Tlačidlo, JTextField - textové pole, JTextArea - textová

plocha atď.). Trieda mimo iného obsahuje aj odlišné funkcie, ktoré ovplyvňujú funkcionality týchto inštancií, respektíve je možné prostredníctvom nich vrátiť hodnotu textu, ktorý je vpísaný napríklad do textových polí.

Okrem uvedených funkcií obsahuje trieda *Window* aj niekoľko interných, či vnorených tried. Tieto interné triedy implementujú rozhranie *ActionListener*", prípadne *"WindowListener"*, a vďaka tomu aj funkcie, prostredníctvom ktorých sú naprogramované činnosti, ktoré sa vykonávajú v prípade stlačenia konkrétneho tlačidla situovaného v okne používateľského rozhrania.

Triedy *resultTableListener*, *resultGraphsListener*, *closeListener*, *pathMenuItem*, *restoreListener*, *infoListener*, *saveListener*, *stopListener*, *addSet*, *deleteSet*, *deleteAll*, *startListener* uplatňujú funkciu, ktorú si "požičali" zo spomínaného rozhrania *ActionListener(ActionEvent e)*, ktorá vykoná určitú akciu po stlačení tlačidla. Trieda *closeProgram*, na rozdiel od ostatných uvádzaných, uplatňuje funkciu *windowClosing(WindowEvent e)* z rozhrania *WindowListener*, táto trieda sa stará o ukončenie programu po stlačení červeného krížika, v pravom hornom rohu okna.

Každá vnútorná trieda, ktorá patrí triede *Window*, disponuje určitou funkcionalitou:

- **startListener** - kontroluje existenciu cesty pre uloženie súboru s nameranými hodnotami a nastavenie vzdialenosti svetelného zdroja, a senzora, v prípade prepočtu nameraných hodnôt intenzity osvetlenia na svietivosť zdroja. V prípade, ak toto kladne vyhodnotí vytvorí nový objekt triedy *ThreadM*, a následne volá funkciu tejto triedy *startThread()*, ktorá spustí vlákno merania.
- **stopListener** - pomocou vytvorenej inštancie vlákna merania pristupuje k funkcii *stopMeasuremantThread()*, ktorá má za úlohu prebiehajúce meranie zastaviť,
- **infoListener** - prostredníctvom objektu, ktorý sprostredkúva Java - *JOptionPane*, otvorí pomocou funkcie *showMessageDialog()* dialógové okno s jednoduchou správou, určenou pre používateľa,
- **saveListener** - cez objekt triedy *propertiesFile* pristupuje k funkcii *set\_Property()*, čím umožňuje uložiť parametre svetidla, svetelného zdroja, ale aj parametre samotného merania do "textového"(.properties) dokumentu, odkiaľ je možné ich následne prostredníctvom funkcie *get\_Property()* opätovne načítať. Parametre sa ukladajú v podobe reťazcov (String).
- **restoreListener** - pristupuje k funkciám cez rovnaký objekt ako trieda *saveListener*, využíva funkciu *undoProperties()*, čím obnovuje nastavenia uložené v defaultnom "textovom"(.properties) súbore,
- **closeListener** - po stlačení tlačidla Exit zobrazí správu, v dialógovom okne, s možnosťami, či si používateľ skutočne želá program vypnúť, využíva na svoju činnosť triedu *JOptionPane*, a jej funkciu *showOptionDialog()*. V prípade, že používateľ odpovie kladne, program ukončí.

- **closeProgram** - pri pokuse o vypnutie programu sa zobrazí správa v dialógovom okne, s možnosťami, či si používateľ skutočne želá program vypnúť, využíva na svoju činnosť triedu *JOptionPane*, a jej funkciu *showOptionDialog()*, v prípade, že používateľ odpovie kladne, program ukončí. Jedná sa o totožnú funkcionálnosť, ako v prípade inštalácie triedy *closeListener*, avšak v tomto prípade sa implementuje iné rozhranie.

- **pathMenuItem** - prostredníctvom inštalácie triedy *JFileChooser* zobrazí okno pre výber zložky na ukladanie súborov,

- **resultGraphsListener** - inicializuje inštaláciu triedy *GraphsWindow*,

- **resultTableListener** - inicializuje inštaláciu triedy *TableWindow*,

### **Trieda *GraphsWindow***

V prípade ukončeného merania je možné prostredníctvom tlačidiel hlavného používateľského okna vytvoriť objekt triedy *GraphsWindow*. Táto trieda prostredníctvom knižnice *JFreeChart* umožňuje vytvárať grafy, ktoré sú v prípade programu používateľského rozhrania použité na vykreslenie priestorového rozdelenia hodnôt svietivosti skúmaného zdroja, v rámci jednotlivých C-rovín, v ktorých sa meranie uskutočňovalo.

Trieda prostredníctvom preposlaných hodnôt z vlákna merania, funkcií, ktoré tieto výsledky upravujú do požadovanej podoby, a dvoch vnútorných tried *xyGraphListener*, *polarGraphListener*, vykresľuje v grafoch s hodnotami svietivosti v polárnych a kartézskych súradniciach.

### **Trieda *TableWindow***

Trieda je veľmi podobná predchádzajúcej triede *GraphsWindow*. Prostredníctvom konštruktora inicializuje objekty, ktoré okno tvoria, a rovnako preberá hodnoty z vlákna merania, ktoré následne upravuje v rámci tu situovaných funkcií. Tvorba tabuľky vychádza s dostupnej triedy *JTable*, ktorej objekt preberá upravené hodnoty výsledného merania, a zobrazuje ich.

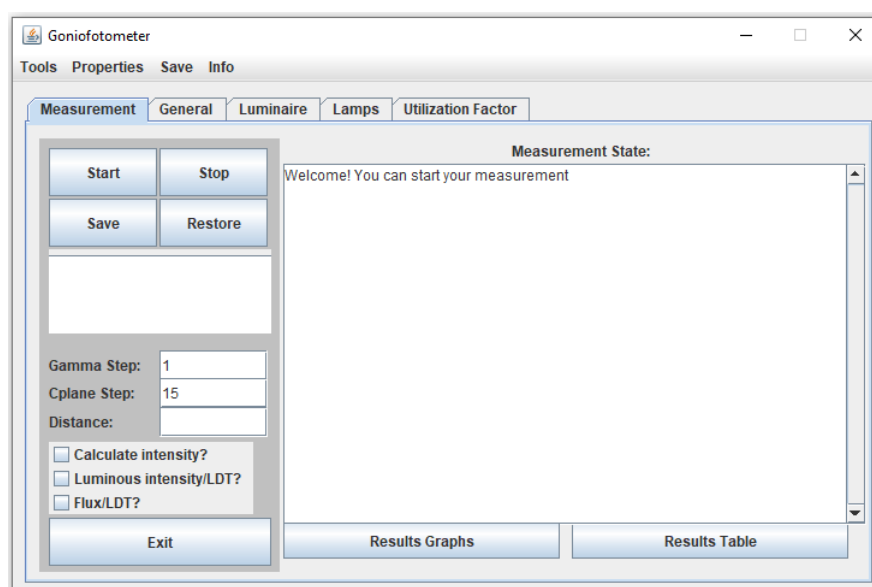
Je dôležité uviesť, že možnosť vytvorenia inštalácie prostredníctvom tlačidiel používateľského rozhrania sa sprístupní, až keď je merací proces ukončený a dáta prichádzajúce z Arduina upravené. Toto obmedzenie je totožné aj v prípade triedy *GraphsWindow*.



## 9 Používateľské rozhranie Goniofotometra

Používateľské rozhranie je naprogramované v jazyku Java, pričom jeho hlavnou úlohou je samozrejme poskytnúť užívateľovi prehľadný a jednoduchý spôsob, akým môže vykonať testovanie rozloženia svietivosti svetelného zdroja. Okrem tejto primárnej vlastnosti má za úlohu komunikovať s vývojovou doskou, vymieňať si s ňou dáta, odosielať príkazy, ktoré určujú proces merania, a prijímať hodnoty, poskytované svetelným senzorom. Takto získané hodnoty neskôr program upravuje do požadovanej podoby, aby bol možný ich zápis do tabuľkovej či grafickej formy, prípadne ich uloženie v podobe vybraných textových formátov.

### 9.1 Funkcionality používateľského rozhrania



Obr. 9.1: Používateľské rozhranie Goniofotometra bezprostredne po zapnutí

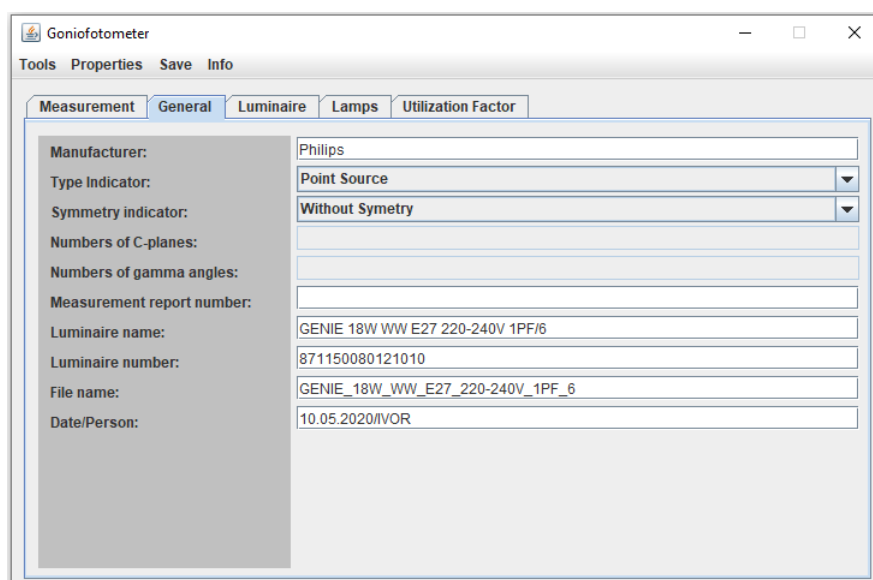
Vyššie zobrazený obrázok 9.1 predstavuje používateľské rozhranie goniofotometra, pričom túto primárnu obrazovku môžeme rozčleniť na niekoľko funkčne oddelených častí. Ako prvé je dobré si všimnúť tlačidlá na ľavej strane obrazovky, a to konkrétne tlačidlá **Start**, **Stop**, **Save**, **Restore**, prípadne vypínacie tlačidlo **Exit**. Každé tlačidlo sprostredkúva osobitnú funkciu, ktorá priamo ovplyvňuje proces merania.

Tlačidlo **Start** spúšťa proces merania, pričom po jeho aktivácii sa prostredníctvom sériovej komunikácie odošle po sériovej linke hodnota reťazca (String) **START**, táto je neskôr analyzovaná v časti programu pre Arduino. V prípade, že Arduino správne vyhodnotí, "potvrdí", že je pripravené, čím sa zároveň testuje spätná

komunikácia, načo program používateľského rozhrania prepošle podrobnosti o požadovanom kroku oboch motorov, prípadne hodnotu vzdialenosti svetelného zdroja a senzora. Týmto spôsobom sa inicializuje merací proces.

Merací proces je možné prerušiť, a to konkrétne aktiváciou tlačidla **Stop**, pričom podobne ako pri predchádzajúcom tlačidle **Start** prebieha komunikácia prostredníctvom sériovej linky, tentokrát sa však odosiela reťazec STOP. Tento príkaz sa opäť vyhodnocuje, pričom v prípade, že je reťazec vyhodnotený korektne, dochádza k prerušeniu merania a prechodu zariadenia do neaktívneho stavu.

**Save** umožňuje uložiť podstatné parametre svietidla, ku ktorým patria napríklad informácie o výrobcovi, výkon, čas merania, osoba ktorá meranie vykonáva, a mnoho ďalších. Informácie, ktoré je možné uložiť, sú kompatibilné so štruktúrou dátového formátu Eulumat, čo je dôležité v prípade, že požadujeme ukladanie informácií o svietidle v tomto formáte.



The screenshot shows a software window titled "Goniophotometer" with a menu bar containing "Tools", "Properties", "Save", and "Info". Below the menu bar are four tabs: "Measurement", "General", "Luminaire", "Lamps", and "Utilization Factor". The "General" tab is active, displaying a list of parameters on the left and their corresponding input fields on the right. The parameters and their values are:

Parameter	Value
Manufacturer:	Philips
Type Indicator:	Point Source
Symmetry indicator:	Without Symetry
Numbers of C-planes:	
Numbers of gamma angles:	
Measurement report number:	
Luminaire name:	GENIE 18W WW E27 220-240V 1PF/6
Luminaire number:	871150080121010
File name:	GENIE_18W_WW_E27_220-240V_1PF_6
Date/Person:	10.05.2020/IVOR

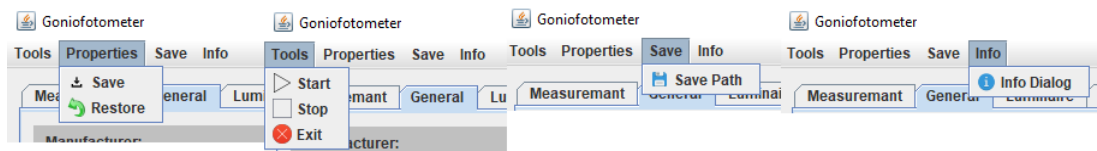
Obr. 9.2: Možnosť ukladania je sprostredkovaná vpisovaním údajov do konkrétnych textových polí, a následnou aplikáciou tlačidla Save.

V prípade, že si používateľ praje obnoviť nastavenia, ktoré boli prítomné pri štarte programu, je panel s tlačidlami doplnený o tlačidlo **Restore**, ktoré načíta z textového súboru (.properties) zadané parametre.

Posledným tlačidlom je tlačidlo **Exit**, ktoré program používateľského rozhrania ukončí.

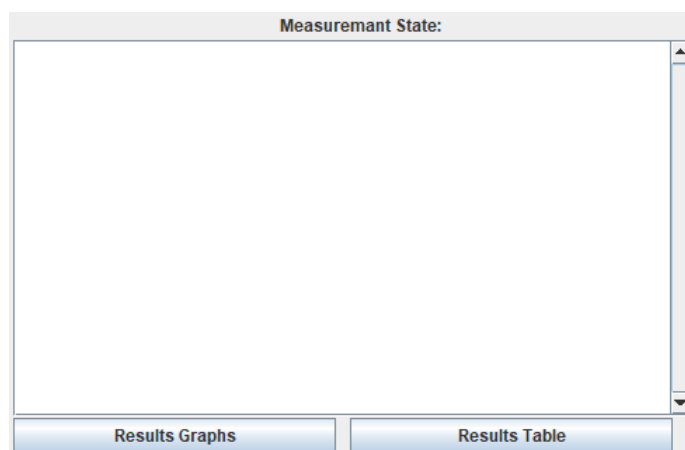
Funkcionalita popísaných tlačidiel je zduplikovaná prostredníctvom záložiek v ľavom hornom rohu používateľského okna. Nachádzajú sa tu záložky **Tools**, **Properties**, **Save** a **Info**. Záložky **Tools** a **Properties** prinášajú totožné možnosti

ovládania meracieho procesu zariadenia, a ukladania parametrov svietidiel, ako predtým popísané ovládacie tlačidlá. Novú funkcionality poskytujú zvyšné dve záložky. Záložka **Save** umožňuje nastaviť cestu pre uloženie súborov do vybranej zložky, a záložka **Info** zobrazuje okno s jednoduchou správou.



Obr. 9.3: Záložky používateľského rozhrania.

Čo sa týka používateľského rozhrania, popísali sme si základné funkcionality tlačidiel a záložiek, a načrtli možnosti ukladania parametrov. Rozhranie však navyše umožňuje funkciu textového poľa, ktoré zobrazuje základné informácie o priebehu meracieho procesu, spolu s tlačidlami otvárajúcimi dialógové okná s grafmi a tabuľkou, zobrazujúcou výsledky merania.

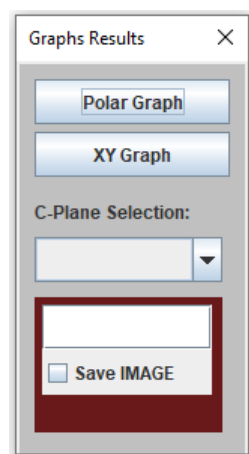


Obr. 9.4: Informatívne textové pole a tlačidlá zobrazujúce výsledky merania.

### 9.1.1 Okno Results Graphs

V prípade ukončeného merania priestorového rozloženia svietivosti, poskytuje hlavné okno používateľského rozhrania viz. 9.1 možnosť zobrazenia okna s nameranými hodnotami, ktoré sú zobrazené formou tabuľky a okno, ktoré umožňuje užívateľovi vybrať, a zobraziť hodnoty namerané senzorom prostredníctvom grafov.

Okno Results Graphs viditeľné na obr. 9.5 poskytuje užívateľovi možnosť vybrať si typ zobrazeného grafu, ako aj špecifikáciu konkrétnej nameranej C roviny, ktorá je súčasťou súboru nameraných hodnôt. Okrem zmienených komponentov, okno umožňuje uložiť obrázok vzniknutého grafu vo forme súboru .png.



Obr. 9.5: Okno Results Graphs umožňujúce výber jednotlivých C rovin, ktoré je možné vizualizovať.

### 9.1.2 Okno Results Table

	0	1	2	3	4
C0	254.25	254.25	254.25	254.25	254.25
C30	254.25	254.25	254.25	254.25	254.25
C60	254.25	254.25	254.25	254.25	252.00
C90	254.25	254.25	254.25	254.25	254.25
C120	254.25	254.25	254.25	252.00	252.00
C150	254.25	254.25	254.25	254.25	254.25
C180	254.25	254.25	252.00	252.00	252.00
C210	254.25	252.00	252.00	249.75	249.75
C240	254.25	254.25	254.25	252.00	252.00
C270	254.25	252.00	252.00	252.00	249.75
C300	254.25	254.25	254.25	254.25	252.00
C330	254.25	254.25	254.25	252.00	252.00

Obr. 9.6: Okno Results Table umožňujúce zobrazenie nameraných hodnôt svietivosti formou tabuľky.

Možnosť otvorenia okna sa podobne, ako to bolo v predchádzajúcom prípade aktivuje, až v prípade dokončeného merania. Obr. 9.6 znázorňuje štruktúru okna zobrazujúceho tabuľku hodnôt osvetlenia, či svietivosti, ako aj tlačidlá, ktoré slúžia na uloženie obsahu tabuľky, respektíve výsledkov merania v podobe vybraných fotometrických dátových formátov.

## 10 Meranie a vizualizácia

Testovanie skonštruovaného goniofotometra prebiehalo v dvoch fázach, v závislosti na funkcionalite prístroja.

V prvej fáze bolo testovanie zamerané na vizualizáciu a porovnanie vybraných kriviek svietivosti, vybraných svetelných zdrojov, ku ktorým výrobca poskytol fotometrické súbory, obsahujúce namerané hodnoty svietivosti, ako aj grafické znázornenie rozloženia svietivosti v daných rovinách, s prihliadnutím na symetrickosť zdroja svetla.

Druhá fáza využíva schopnosť zariadenia vypočítať hodnotu svetelného toku skúmaného zdroja svetla. V tejto fáze prebehlo opätovne meranie vybraných svetelných zdrojov, ku ktorým bola poskytnutá dokumentácia, obsahujúca informácie o veľkosti ich svetelného toku. Namerané hodnoty svetelných tokov, boli následne porovnané s dostupnými údajmi od výrobcov.

### 10.1 Vizualizácia kriviek svietivosti

V procese určovania kriviek svietivosti, goniofotometer testoval dva svetelné zdroje, ktoré majú veľmi podobnú konštrukciu, avšak líšia sa rozdelením mohutnosti svietivosti v rámci priestoru, do ktorého vyžarujú svetelné žiarenie. Konkrétne sa jedná o zdroj vyrábaný firmou Philips **Corepro LEDspot 4.6-50W GU10 827 36D** obr. 10.1 a zdroj **LED Classic MR16 8W GU10** obr. 10.6, poskytovaný firmou EMOS.

Samotnému procesu merania svietivosti zdrojov, predchádzalo nastavenie prístroja spolu s umiestnením fotometrického senzora, a vytýčenie vzdialenosti, v ktorej budú svetelné zdroje merané.

Vďaka navrhnutému programu dokáže goniofotometer vizualizovať všetky krivky svietivosti, v ktorých meranie prebiehalo, pričom ich počet sa odvíja od prvého nastavenia procesu merania, v hlavnom okne používateľského rozhrania 9.1. Jednotlivé krivky môžu zobrazovať priestorové rozloženie hodnôt intenzity osvetlenia, svietivosti, alebo pomernú hodnotu svietivosti vzťahnutú na svetelný zdroj, či svetidlo, s hodnotou svetelného toku 1000 lm, podľa štandardu ukladania hodnôt svietivosti, vo formáte **.ldt**.

#### **Philips Corepro LEDspot 4.6-50W GU10 827 36D**

Uvedené grafy kriviek svietivosti, vo vybraných fotometrických rovinách, znázornených na obr. 10.4 a obr. 10.5 vykazujú značnú podobnosť, avšak je možné si povšimnúť určité rozdiely. Tieto viditeľné odchylky v sebe združujú neistoty a chyby

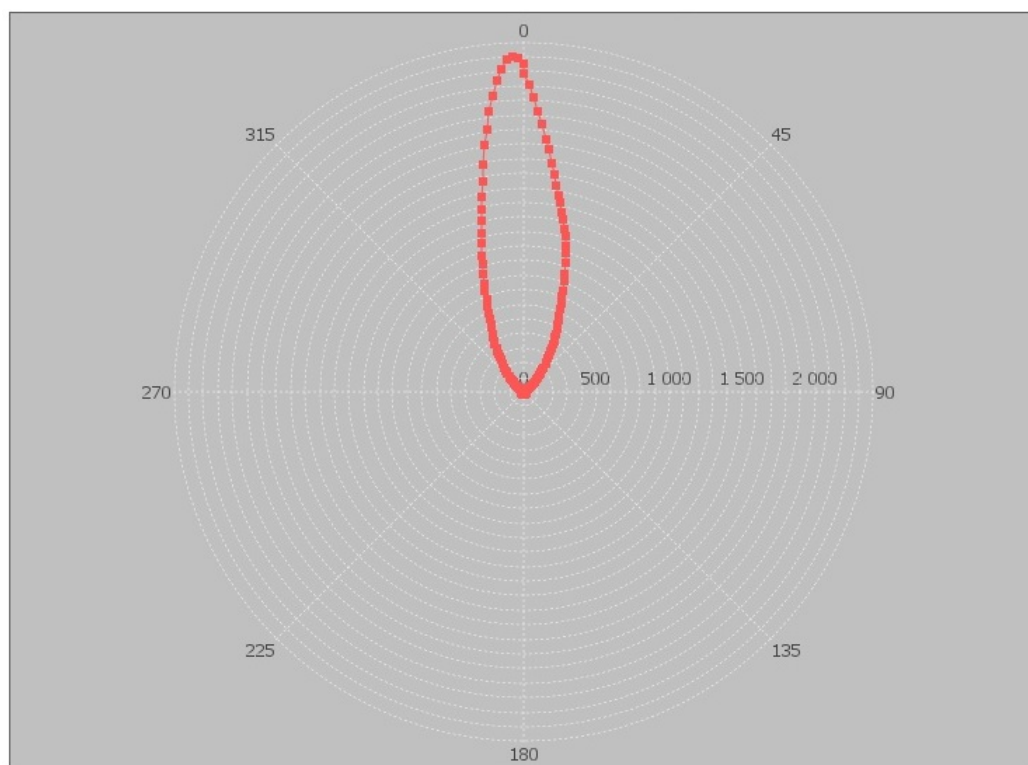
merania, ktoré sa vyskytli v procese merania parametrov svetelného zdroja. Najrelevantnejšie chyby vidím osobne, najmä v samotnom nastavení prístroja goniofotometra, ako aj nedokonalosťami prostredia, v ktorom dané meranie prebiehalo. Takto vzniknuté chyby merania je možné minimalizovať použitím kvalitných pomocných meracích prístrojov, ako aj snahou prispôbiť miestnosť, v ktorej meranie prebieha, náročným podmienkam, odpovedajúcim zložitosti a citlivosti tohto druhu merania.



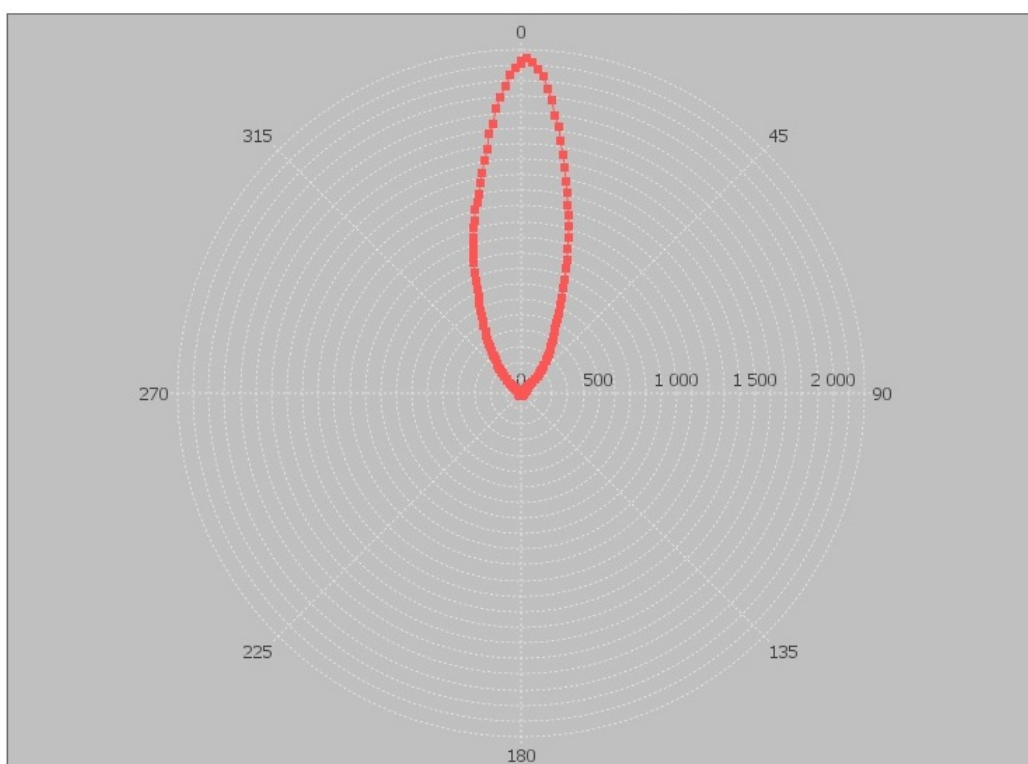
Obr. 10.1: Svetelný zdroj Corepro LEDspot 4.6-50W GU10 827 36D, použitý pri testovaní goniofotometra[26]

Tab. 10.1: Prehľad parametrov svetelného zdroja Philips Corepro LEDspot[26]

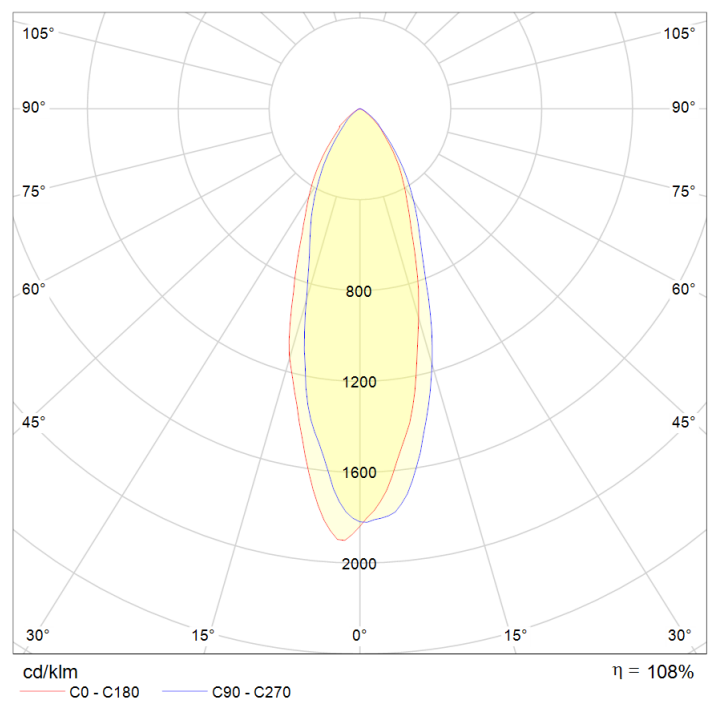
Svetelný tok	355 lm
Patica (upevnenie zdroja)	GU10
Technológia	LED
Príkon	4.6 W
Teplotná chromatickosť	2700 K
Svetelná účinnosť	77.00 lm/W
Napájacie napätie	220-240 V
Rozmery	50 × 54 mm



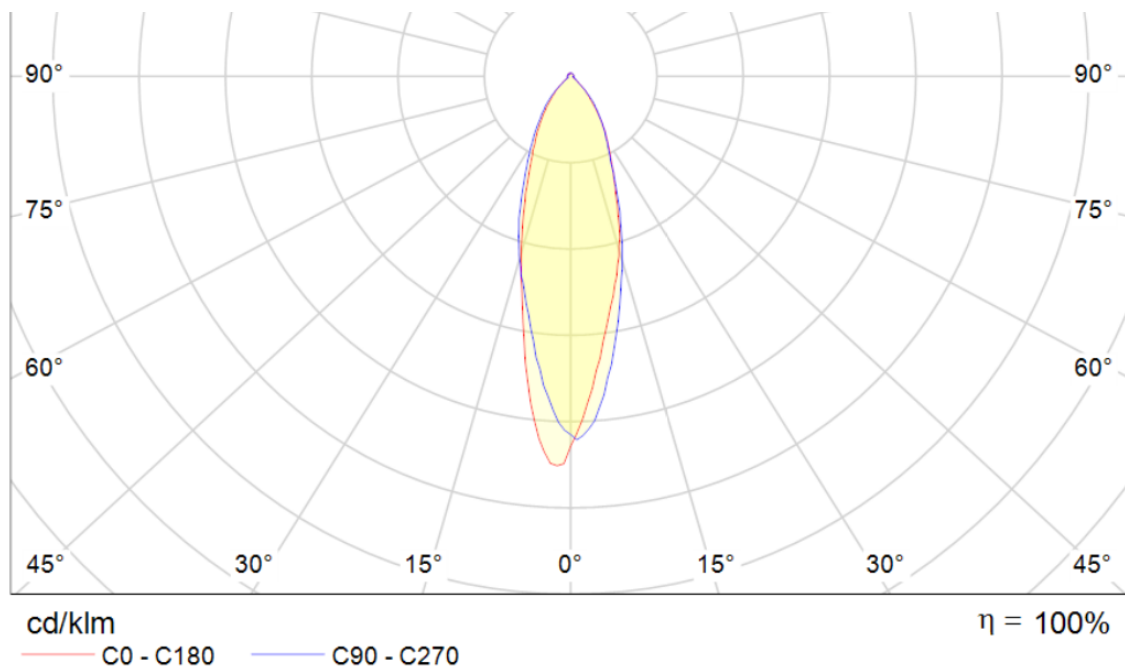
Obr. 10.2: Znázornenie krivky svietivosti vo fotometrických rovinách C0-C180



Obr. 10.3: Znázornenie krivky svietivosti vo fotometrických rovinách C90-C270



Obr. 10.4: Znázornenie kriviek svetivosti C0-C180 a C90-C270 poskytnutých výrobcom



Obr. 10.5: Znázornenie kriviek svetivosti C0-C180 a C90-C270 nameraných zostrojeným goniofotometrom



### EMOS LED Classic MR16 8W GU10

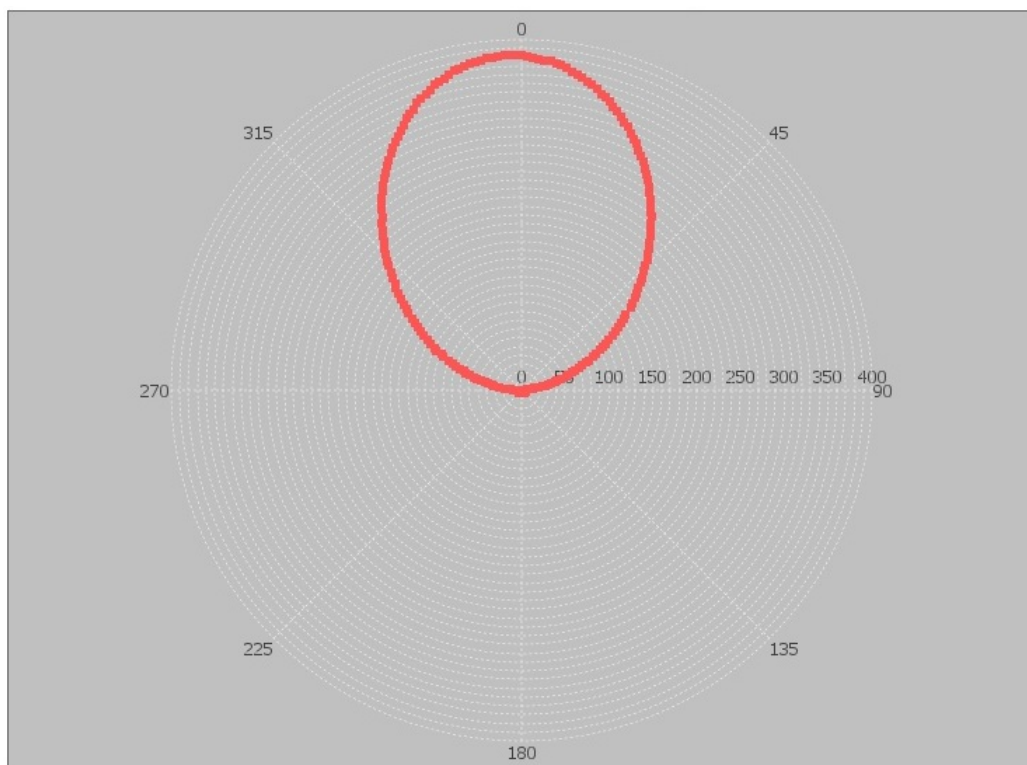
Opäťovne sa stretávame so značnou podobnosťou, čo sa týka zobrazených grafov 10.9, 10.10, avšak súčasne sa prejavujú aj rovnaké nedostatky, ktoré sa týkali predchádzajúceho meraného svetelného zdroja. Vo väčšej miere sa prejavuje chyba, ktorá súvisí s posunom fotometrického stredu svetelného zdroja v priebehu merania.



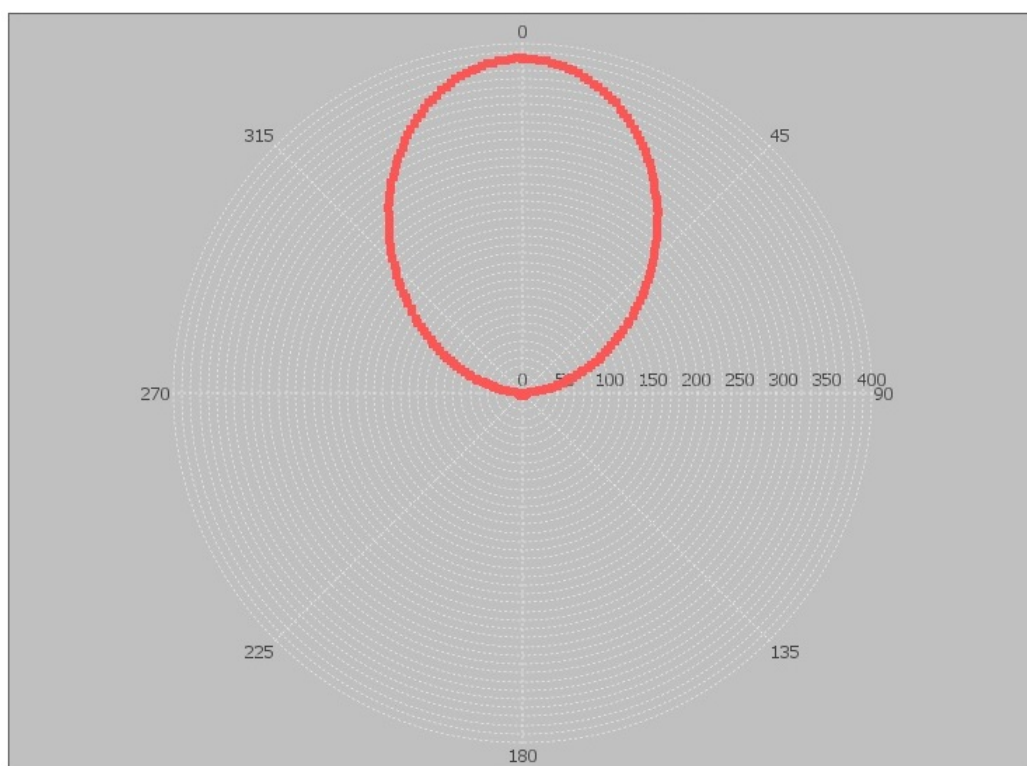
Obr. 10.6: Svetelný zdroj LED Classic MR16 8W GU10, použitý pri testovaní goniofotometra[27]

Tab. 10.2: Prehľad parametrov svetelného zdroja EMOS LED Classic[27]

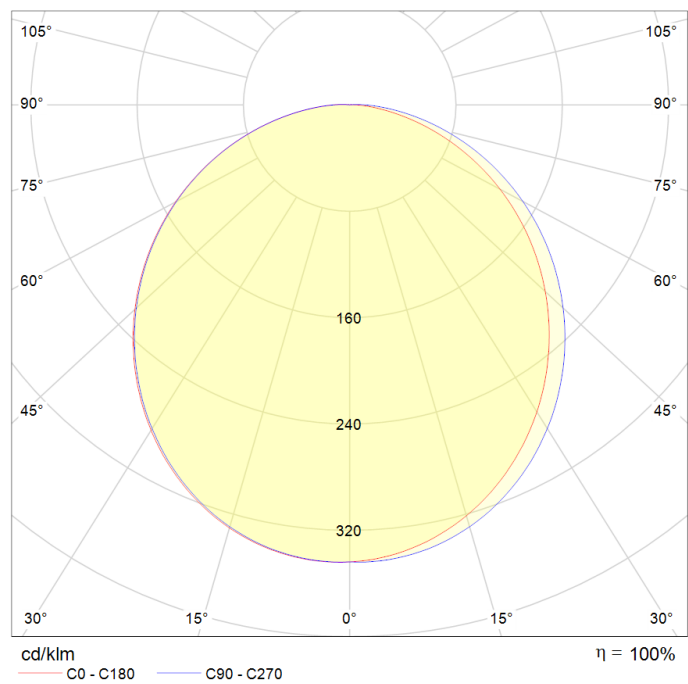
Svetelný tok	720 lm
Patica (upevnenie zdroja)	GU10
Technológia	LED
Príkon	8 W
Teplotná chromaticnosť	4100 K
Svetelná účinnosť	90 lm/W
Napájacie napätie	230 V /50 Hz
Rozmery	50 × 56 mm



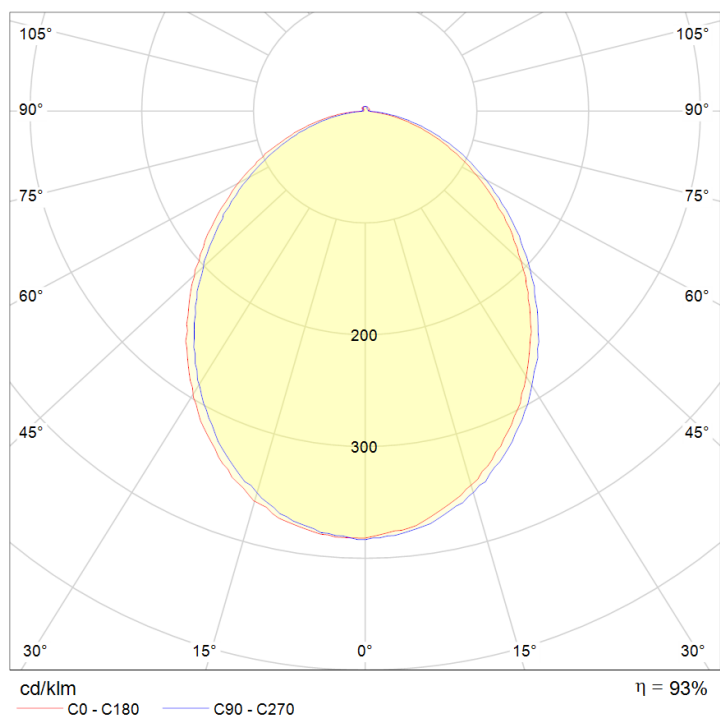
Obr. 10.7: Znázornenie krivky svietivosti vo fotometrických rovinách C0-C180



Obr. 10.8: Znázornenie krivky svietivosti vo fotometrických rovinách C90-C270



Obr. 10.9: Znázornenie kriviek svetivosti C0-C180 a C90-C270, poskytnutých výrobcom



Obr. 10.10: Znázornenie kriviek svetivosti C0-C180 a C90-C270, nameraných zariadeným goniofotometrom

## 10.2 Meranie svetelného toku $\Phi$

V procese vyhodnocovania svetelného toku  $\Phi$  prostredníctvom skonštruovaného goniofotometra boli použité, okrem predchádzajúcich zdrojov **EMOS LED Classic MR16 8W GU10** a **Philips Corepro LEDspot 4.6-50W GU10 827 36D**, ďalšie dva dodatočné zdroje, a to konkrétne zdroje **Philips GENIE 18W WW E27 220-240V 1PF/6**, a **Philips Corepro Lustre ND 5.5-40W E27 827 P45 FR**. Uvedená tabuľka 10.3 zobrazuje výsledky nameraného svetelného toku  $\Phi_p$ , navrhnutým prístrojom, svetelného toku  $\Phi_m$ , ktorý výrobca poskytuje v priloženej dokumentácii, ako aj svetelného toku  $\Phi_f$ , ktorý výrobca poskytol, buď formou fotometrického súboru **.ldt**, **.ies**, alebo v dodatočných informačných materiáloch k uvedeným zdrojom.



Obr. 10.11: Svetelné zdroje použité pri testovaní goniofotometra. Zľava Philips Corepro LEDspot, Philips Corepro Lustre, Philips GENIE, EMOS LED Classic.

Tab. 10.3: Prehľad hodnôt svetelného toku a percentuálnych rozdielov týchto tokov, uvedených testovaných svetelných zdrojov.

Svetelný zdroj	$\Phi_m$ [lm]	$\Phi_f$ [lm]	$\Phi_p$ [lm]	$\Phi_m$ & $\Phi_p$ [%]	$\Phi_f$ & $\Phi_p$ [%]
EMOS LED Classic	720	756	670,573	-7.37%	-12.74%
Philips Corepro LEDspot	355	395	392,046	+9.45%	-0.75%
Philips GENIE	1040	1100	1034,085	-0.57%	-6.37%
Philips Corepro Lustre	470	470	454,568	-3.39%	-3.39%

Hodnoty svetelných tokov  $\Phi$  v tab. 10.3 medzi nameranými a poskytnutými hodnotami, je možné pomerne jednoducho vysvetliť.

V prvom rade je nutné si uvedomiť, že hodnoty poskytnuté výrobcom sú poväčšine parametre menovité, a teda sa vzťahujú na konkrétnu radu, či typ svetelného zdroja. Takéto menovité parametre, nie sú vo väčšine prípadov presnými hodnotami, ktoré konkrétny fyzický zdroj svetla nadobúda. V prípade, ak porovnávame

dva svetelné zdroje toho istého typu, s rovnakými menovitými parametrami zistíme, že hodnota, napríklad svetelného toku nie je rovnaká, ale líši sa o určitú malú percentuálnu hodnotu. Tieto prirodzené rozdiely je možné minimalizovať skvalitnením výrobného procesu, avšak ich úplné odstránenie je nesmierne náročné, priam nemožné.

Samozrejme odlišnosť v prípade merania svetelného toku prostredníctvom navrhnutého goniofotometra, nie je spôsobená, len nezrovnalosťou v prípade menovitých parametrov svetelných zdrojov, avšak aj pridruženými neistotami a chybami, ktoré sa v procese merania mohli vyskytnúť. Celkový proces merania je pomerne náročný, z ohľadom na korektné nastavenie prístroja goniofotometra. V procese nastavenia je nutné správne vytýčiť vzdialenosť svetelného senzora a zdroja osvetlenia, ako aj správne výškové umiestnenie senzora, a natočenie podstavu zariadenia tak, aby bola správne nastavená spojnice medzi aktívnou vyžarovacou časťou svetelného zdroja, a fotometricky aktívnou časťou fotosenzora. Bližšie informácie k neistotám merania je možné vyhľadať v kapitole 5.3.1 *Chyby a neistoty merania - Goniofotometer*.

Chyba merania, a teda aj vzniknuté rozdiely medzi nameranými hodnotami svetelného toku, sú ďalej spôsobené technickou nedokonalosťou zariadenia, hlavne zložitou upevnenia zdroja svetla, a nastavením jeho polohy vzhľadom na fotometrický stred zdroja. Jedná sa o značný problém, ktorý vychádza hlavne z rozdielneho dizajnu, veľkosti, ako aj z iných konštrukčných parametrov, jednotlivých zdrojov svetla. Tento nedostatok je v budúcnosti možné korigovať doplnením prístroja o nastaviteľné vyvažovacie rameno, ktoré by umožňovalo posunutie zdroja a vrchného motora, opisujúceho uhol  $\gamma$ , do požadovanej vzdialenosti. Veľkosť tejto chyby je závislá, aj na vzdialenosti, v ktorej sa prístroj goniofotometra nachádza. V prípade, ak je meranie realizované v maximálnej povolenej vzdialenosti, čo je približne 4,5 metra, je táto chyba do značnej miery redukovaná.

## 10.3 Zhrnutie merania

Celkovo meranie kriviek svietivosti, ako aj svetelného toku vybraných svetelných zdrojov dopadlo úspešne, vzhľadom na schopnosti zariadenie vizualizovať tieto krivky, ako aj určiť hodnoty svetelného toku  $\Phi$  skúmaných zdrojov. Maximálna odchylka, ktorá sa v procese vyhodnocovania celkového svetelného toku vyskytla, sa prejavila pri zdroji EMOS LED Classic, a jej percentuálna hodnota bola 12.74%.

## Záver

Cielom diplomovej práce bolo v prvom rade zostrojenie goniofotometra, ako zariadenia, ktoré je schopné zaznamenať a vyhodnotiť vybrané svetelné parametre svetelných zdrojov, svietidiel, spolu s grafickým používateľským rozhraním. Práca je tradične členená na dve časti, a to časť teoretickú a časť praktickú.

Teoretická časť v sebe združuje teoretické poznatky z odboru fotometrie, základných fotometrických parametrov, ako aj parametrov svetelných zdrojov a svietidiel. Značný rozsah teoretickej časti práce je venovaný metódam, zariadeniam a postupom určovania svetelných parametrov svietidiel, zdrojov svetla, prípadne osvetľovacích sústav. Súčasťou teoretického rozboru sú aj poznatky, ktoré čitateľa informujú, o výskyte možných neistôt a chybách merania, ktoré sa bežne vyskytujú v procese určovania svetelných parametrov, avšak aj poznatky približujúce charakteristické chyby, neistoty merania, spojené priamo s goniofotometrom. Záver teoretickej časti tvorí predstavenie základných svetovo uznávaných fotometrických formátov, najmä formátu Eulumdat, čo je formát obsahujúci fotometrické a technické parametre konkrétneho svetelného zdroja, bežne využívaného na európskom trhu. Informácie o štruktúre uvedeného formátu sú kľúčové z dôvodu implementácie schopnosti ukladania nameraných hodnôt a parametrov v uvedenom formáte.

Praktická časť práce obsahuje popis hardvéru, ktorý zostrojené zariadenie goniofotometra tvorí, ale najmä približuje merací a vizualizačný softvér umožňujúci pracovníkovi vykonať meranie vybraných svetelných parametrov.

Samostatný oddiel praktickej časti tvorí kapitola zameraná na vyhodnotenie a vizualizáciu výsledkov, ktoré boli goniofotometrom namerané, a následne uložené. Tu prebehlo vyhodnotenie fotometrických parametrov zdrojov, čo celkovo priblížilo technické možnosti, ktorými skonštruované zariadenie disponuje. K plusom zariadenia patrí relatívna kompaktnosť, a s tým spojená možnosť prenášania, v prípade nutnosti sprostredkovania merania priamo v teréne, následne jednoduchá obsluha, a diverzita v prípade ukladania nameraných hodnôt vo formáte .csv, ale najmä vo formáte .ldt, či grafické znázornenie nameraných výsledkov priestorového rozdelenia svietivosti zdroja.

Na záver je potrebné podotknúť, že zariadenie je plne funkčné a spĺňa všetky body nachádzajúce sa v zadaní diplomovej práce. Skonštruovaný goniofotometer sa začlení medzi prístrojové vybavenie, nachádzajúce sa v laboratóriu počítačového videnia, kde bude slúžiť, ako praktický výukový prostriedok v priebehu praktických cvičení predmetu MPOV ("Počítačové vidění").

# Literatúra

- [1] SOKANSKÝ, Karel. *Světelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04941-9.
- [2] HABEL, Jiří. *Světlo a osvětlování*. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [3] GAŠPAROVSKÝ, Dionýz a Roman DUBNIČKA. *Mezopické videnie - čo to je a čo to prinesie pre prax?* Světlo [online]. 2018, 21(2), 46-50 [cit. 2020-01-12]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <[http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Svetlo/2018/02/Svetlo\\_02\\_2018/index.html#p=47](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Svetlo/2018/02/Svetlo_02_2018/index.html#p=47)>
- [4] *Interakcia žiarenia a človeka*. In: Neod32.euweb.cz [online]. 2011, 09.01.2011 [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: <<http://www.neod32.euweb.cz/html-kvantova%20fyzika/interakcia.htm>>
- [5] HORŇÁK, Pavol. *Svetelná technika*. Bratislava: ALFA, 1989. ISBN 80-05-00122-3.
- [6] PLCH, Jiří. *Světelná technika v praxi*. Praha: IN-EL, 1999. Knihovnice Elektro. ISBN 80-86230-09-0.
- [7] SIEA. *S energiou efektívne: Osvetlenie v priemysle*. In: S energiou efektívne: Osvetlenie v priemysle [online]. Bratislava: Slovenská inovačná a energetická agentúra, 2013, január 2013 [cit. 2020-01-30]. Dostupné z: <[https://www.siea.sk/wp-content/uploads/files/poradenstvo/publikacie/letaky/osvetlenie\\_v\\_priemysle/SIEA\\_osvetlenievpriemysle.pdf](https://www.siea.sk/wp-content/uploads/files/poradenstvo/publikacie/letaky/osvetlenie_v_priemysle/SIEA_osvetlenievpriemysle.pdf)>
- [8] SOKANSKÝ, Karel a kolektiv. *ZÁKLADY ZÁKLADŮ SVĚTELNÉ TECHNIKY* [online]. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2007 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <[http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/vuee/VUEE\\_Zaklady\\_svetelne\\_techniky.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/vuee/VUEE_Zaklady_svetelne_techniky.pdf)>
- [9] Goniophotometer. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 13.3.2012, last modified on 24.11.2019 [cit. 2020-02-02]. Dostupné z: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Goniophotometer>>
- [10] HABEL, Jiří. *Osvětlování. Vyd. 2*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01770-2.

- [11] BÁLSKÝ, Marek a Jiří HABEL. *Modernizace goniofotometru*. Světlo [online]. Praha: FCC Public, 2009, č. 4, 54-57 [cit. 2020-02-07]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <<http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/modernizace-goniofotometru--15660>>
- [12] AUTODESK INC. *IES Standard File Format*. In: AUTODESK [online]. : 2014, 17.12.2014 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <<https://knowledge.autodesk.com/support/3ds-max/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/3DSMax/files/GUID-EAOE3DE0-275C-42F7-83EC-429A37B2D501-hm.html>>
- [13] AUTODESK INC. *Example of a Photometric Data File*. In: AUTODESK [online]. : 2014, 17.12.2014 [cit. 2020-02-18]. Dostupné z: <<https://knowledge.autodesk.com/support/3ds-max/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/3DSMax/files/GUID-5111A635-2583-400D-B49A-ED169BD060F1-hm.html#GUID-5111A635-2583-400D-B49A-ED169BD060F1>>
- [14] DIAL GMBH. *EULUMDAT format*. In: DIAL [online]. Lüdenscheid: 2017, 14.09.2017 [cit. 2020-02-19]. Dostupné z: <<https://evo.support-en.dial.de/support/solutions/articles/9000074164-eulumat-format>>
- [15] VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Bučovice: Martin Stríž, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.
- [16] ARDUINO. *Arduino Uno Rev3*. In: ARDUINO [online]. Arduino Official Store, 2020, 21.02.2020 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>>
- [17] M, Luboš. Raspberry Pi: *Úvod a výběr desky*. In: Arduino-shop [online]. Havlíčkův Brod: 2018, 05.06.2018 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <[https://navody.arduino-shop.cz/navody-k-produktum/raspberry-pi-uvod-a-vyber-desky.html?gclid=CjwKCAjw8J32BRBCEiwApQEKgfaTpu4RA1k2ZeVHlQThvB01qKkUDDo6Hs0pd18j\\_Wvs2PdN0k5Q5tBoCHBcQAvD\\_BwE](https://navody.arduino-shop.cz/navody-k-produktum/raspberry-pi-uvod-a-vyber-desky.html?gclid=CjwKCAjw8J32BRBCEiwApQEKgfaTpu4RA1k2ZeVHlQThvB01qKkUDDo6Hs0pd18j_Wvs2PdN0k5Q5tBoCHBcQAvD_BwE)>
- [18] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky: 3. díl: Optoelektronika a optoelektronické prvky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-184-5.
- [19] ams AG. *TSL2561Light-to-Digital Converter*. In: Ams [online]. Premstaetten: 2018, 23.04.2018 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <<https://www.ams.com>>



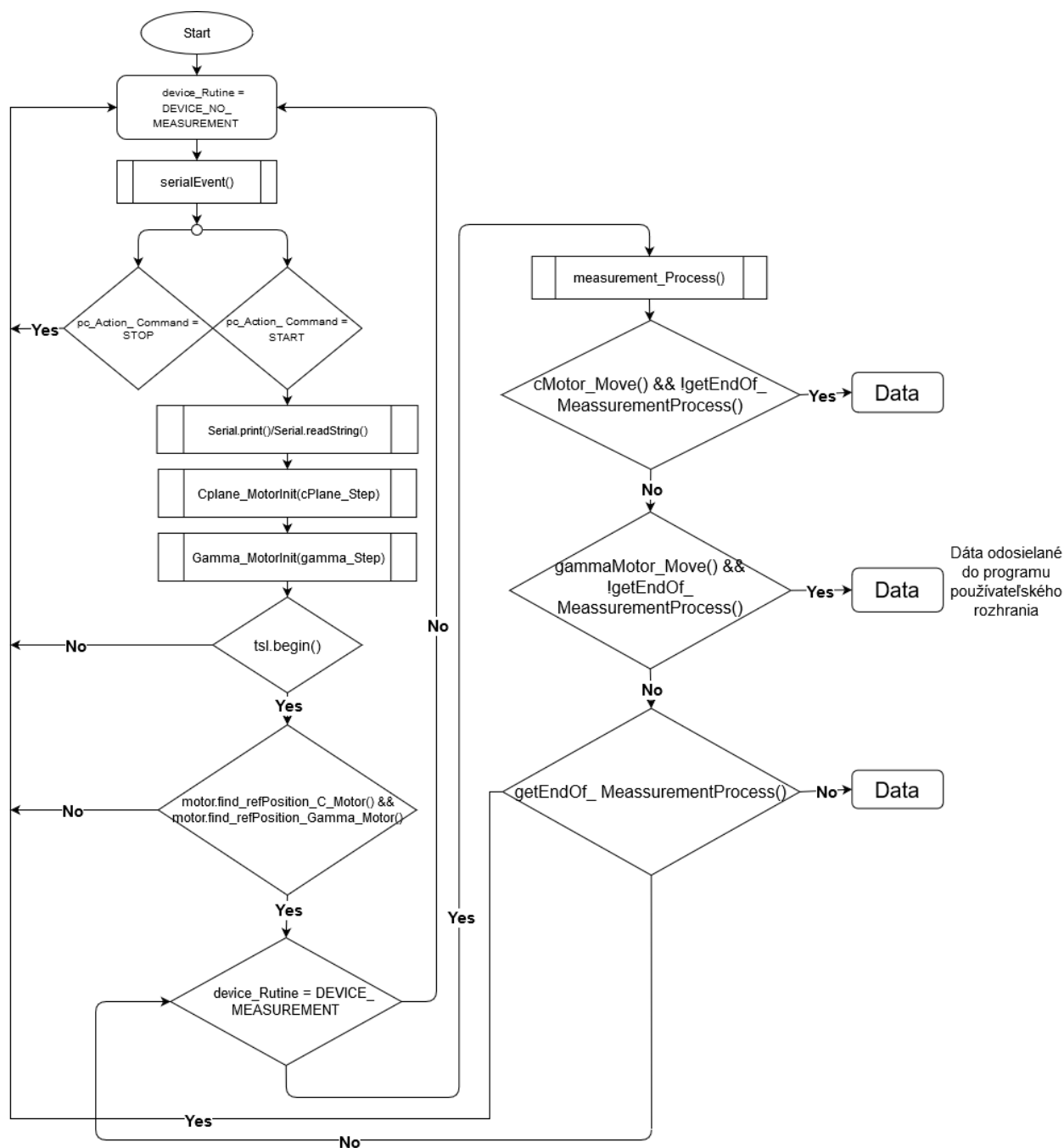
//ams.com/documents/20143/36005/TSL2561\_DS000110\_3-00.pdf/  
18a41097-2035-4333-c70e-bfa544c0a98b

- [20] I<sup>2</sup>C. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 13.03.2012, last modified on 08.03.2020 [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: <<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=I%C2%B2C&action=history>>
- [21] ŠKODA, Jan. *Jak vybrat správný světelný zdroj do domácnosti? – Část 1. Světlo* [online]. Praha: FCC Public s.r.o, 2015, 20.03.2015, 18(2), 34-38 [cit. 2020-03-11]. ISSN 1212-0812. Dostupné z: <[http://www.odbornecasopisy.cz//flipviewer/Svetlo/2015/02/Svetlo\\_02\\_2015/index.html#p=2](http://www.odbornecasopisy.cz//flipviewer/Svetlo/2015/02/Svetlo_02_2015/index.html#p=2)>
- [22] LONGS-MOTOR. *HYBRID STEPPER MOTOR-Nema34 - China Changzhou Longs Motor*. In: Longs-motor.com [online]. nn: longs-motor, 2018 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <<https://www.longs-motor.com/hybrid-stepper-motor-nema34.html>>
- [23] LEADSHINE TECHNOLOGY COMPANY LIMITED. *User's Manual For M542 V2.0* [online]. In: . Leadshine Technology Co., 2008 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <<http://www.cncshop.cz/PDF/M542.pdf>>
- [24] LASKARDUINO. *RobotDyn fotoelektrický snímač otáček*. In: Laskarduino [online]. : laskarduino.cz, 2020 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <<https://www.laskarduino.cz/robotdyn-fotoelektricky-snimac-otacek/>>
- [25] FAZECAST, INC. *JSerialComm*. In: Github.com/Fazecast [online]. neviem: Fazecast, 2020 [cit. 2020-04-28]. Dostupné z: <<https://fazecast.github.io/jSerialComm/>>
- [26] PHILIPS Lighting. *CorePro LEDspot MV*. In: Lighting.philips.com [online]. Signify Holding, 2020, 10.03.2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <[https://www.lighting.philips.com/api/assets/v1/file/content/fp929001215232-pss-cs\\_cz/929001215232\\_EU.cs\\_CZ.PROF.FP.pdf](https://www.lighting.philips.com/api/assets/v1/file/content/fp929001215232-pss-cs_cz/929001215232_EU.cs_CZ.PROF.FP.pdf)>
- [27] EMOS spol. s.r.o. *ZQ8361 LED žárovka Classic MR16 8W GU10 neutrální bílá / EMOS*. In: Shop.emos.cz [online]. EMOS, 2020 [cit. 2020-05-09]. Dostupné z: <<https://shop.emos.cz/1525730402-led-zarovka-classic-mr16-8w-gu10-neutralni-bila>>

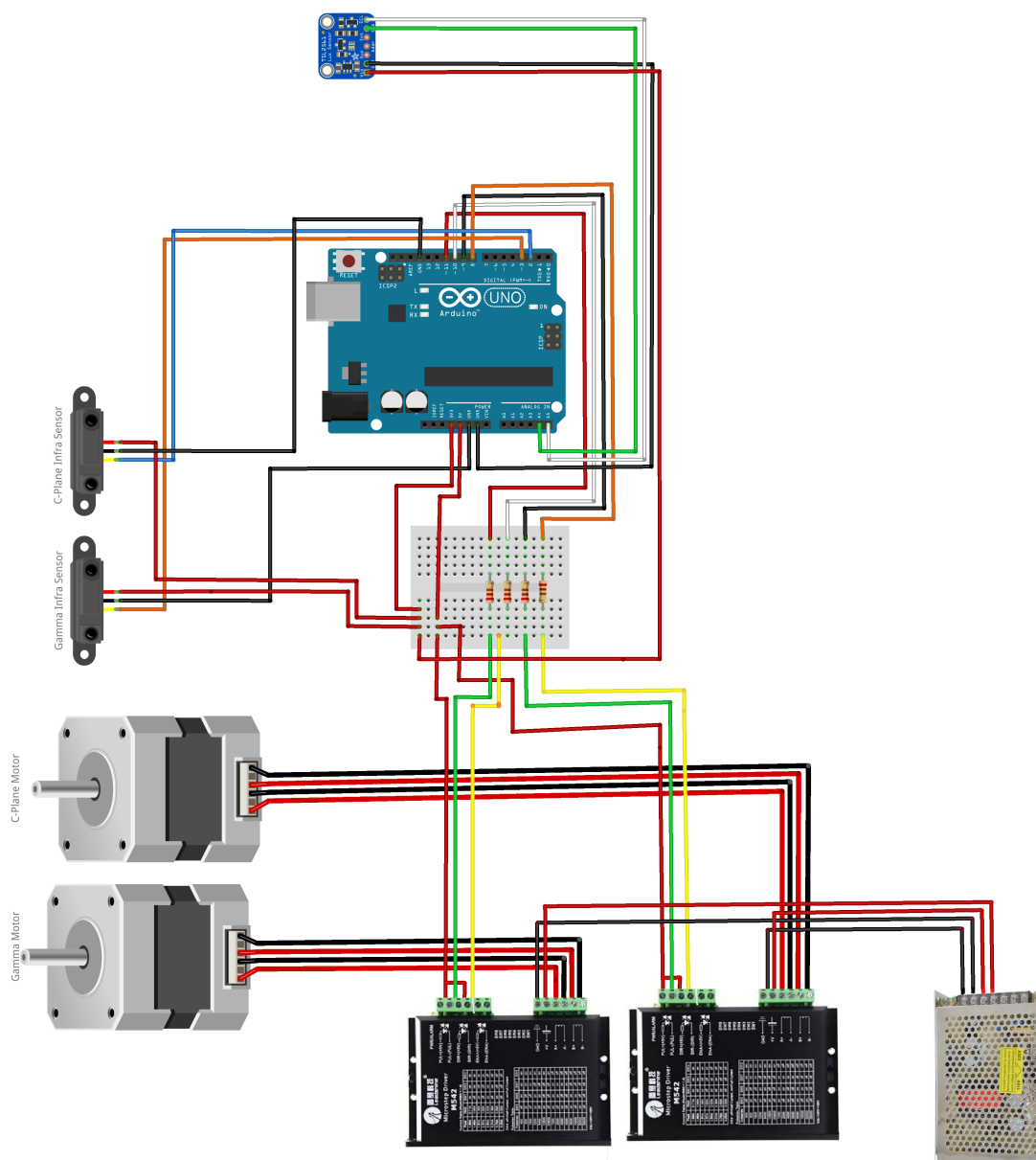
# Zoznam príloh

A	Vývojový diagram programu Arduino Uno	94
B	Schéma zapojenia goniofotometra	95
C	Fotografia zapojenia goniofotometra	96
D	Napájací zdroj	97
	D.1 Pohľad zhora . . . . .	97
	D.2 Zapojenie svoriek . . . . .	97
E	Zapojenie senzora TSL2561	98
F	Fotky goniofotometra	99
G	Obsah priloženého CD	103

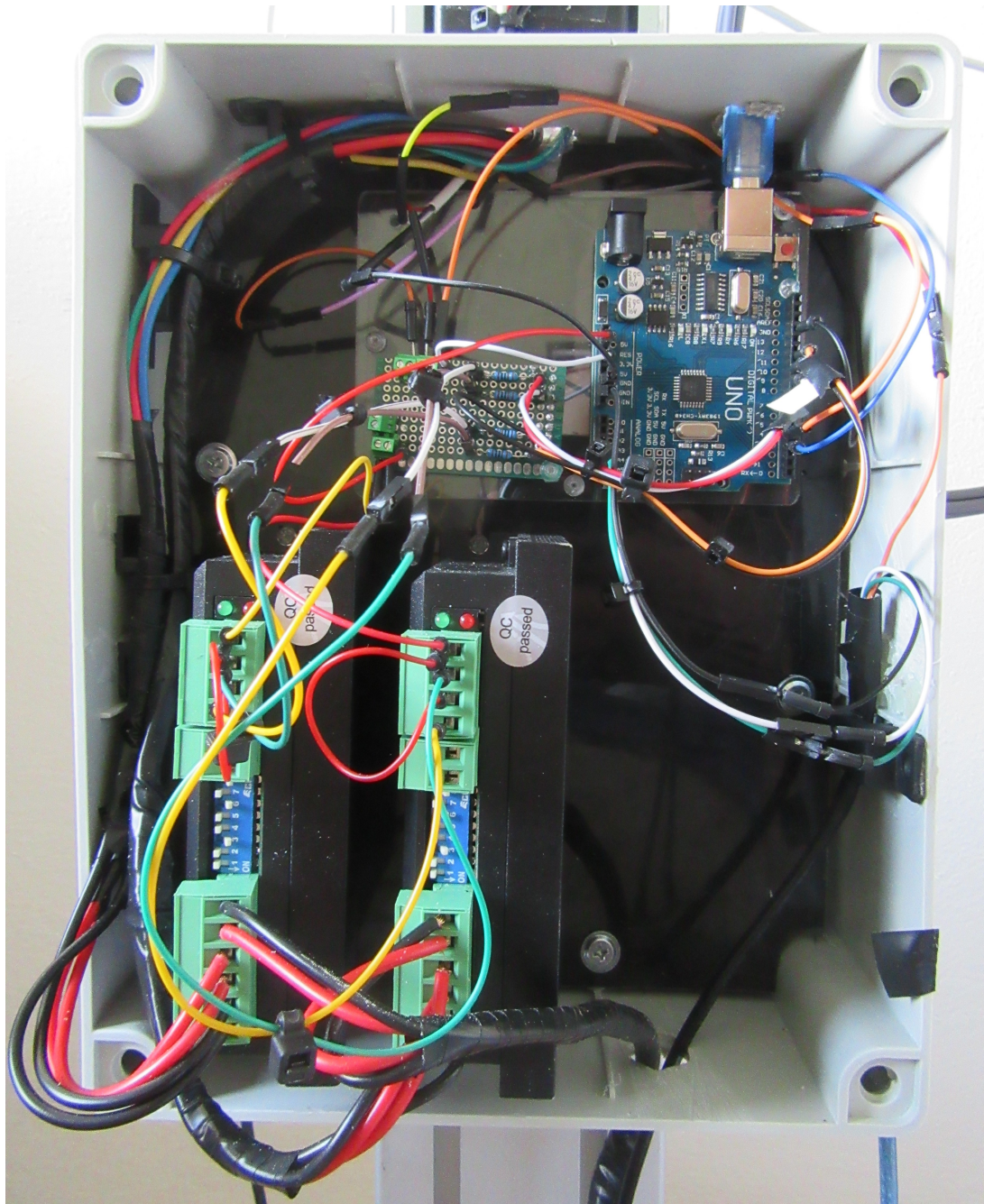
# A Vývojový diagram programu Arduino Uno



## B Schéma zapojenia goniofotometra



## C Fotografia zapojenia goniofotometra



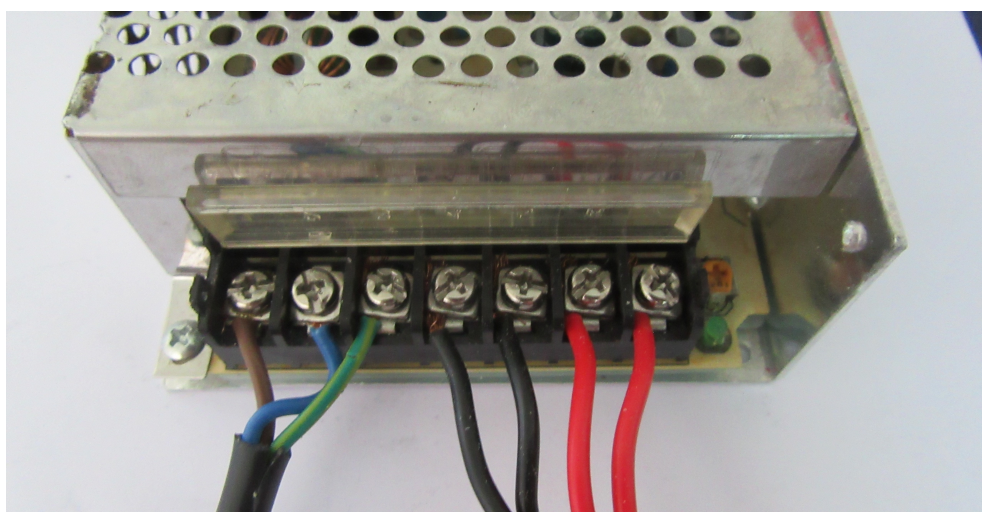


## D Napájací zdroj

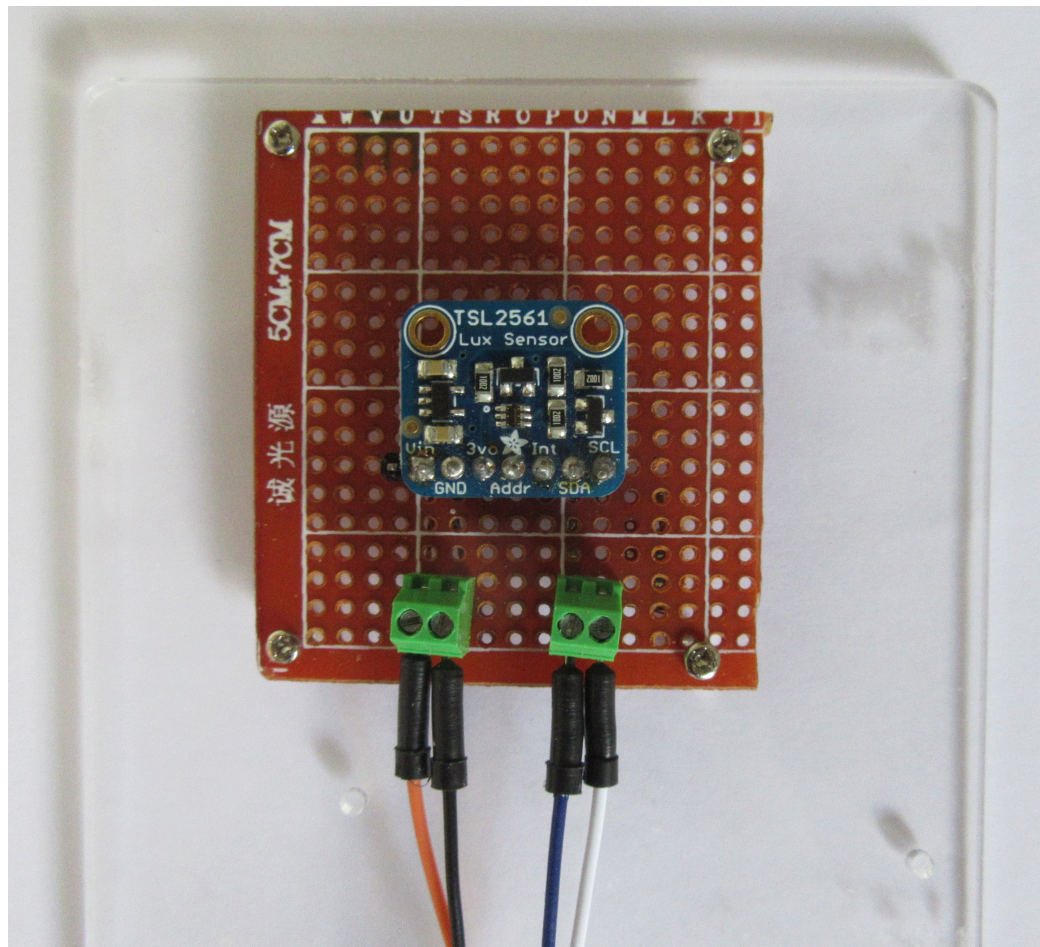
### D.1 Pohľad zhora



### D.2 Zapojenie svoriek

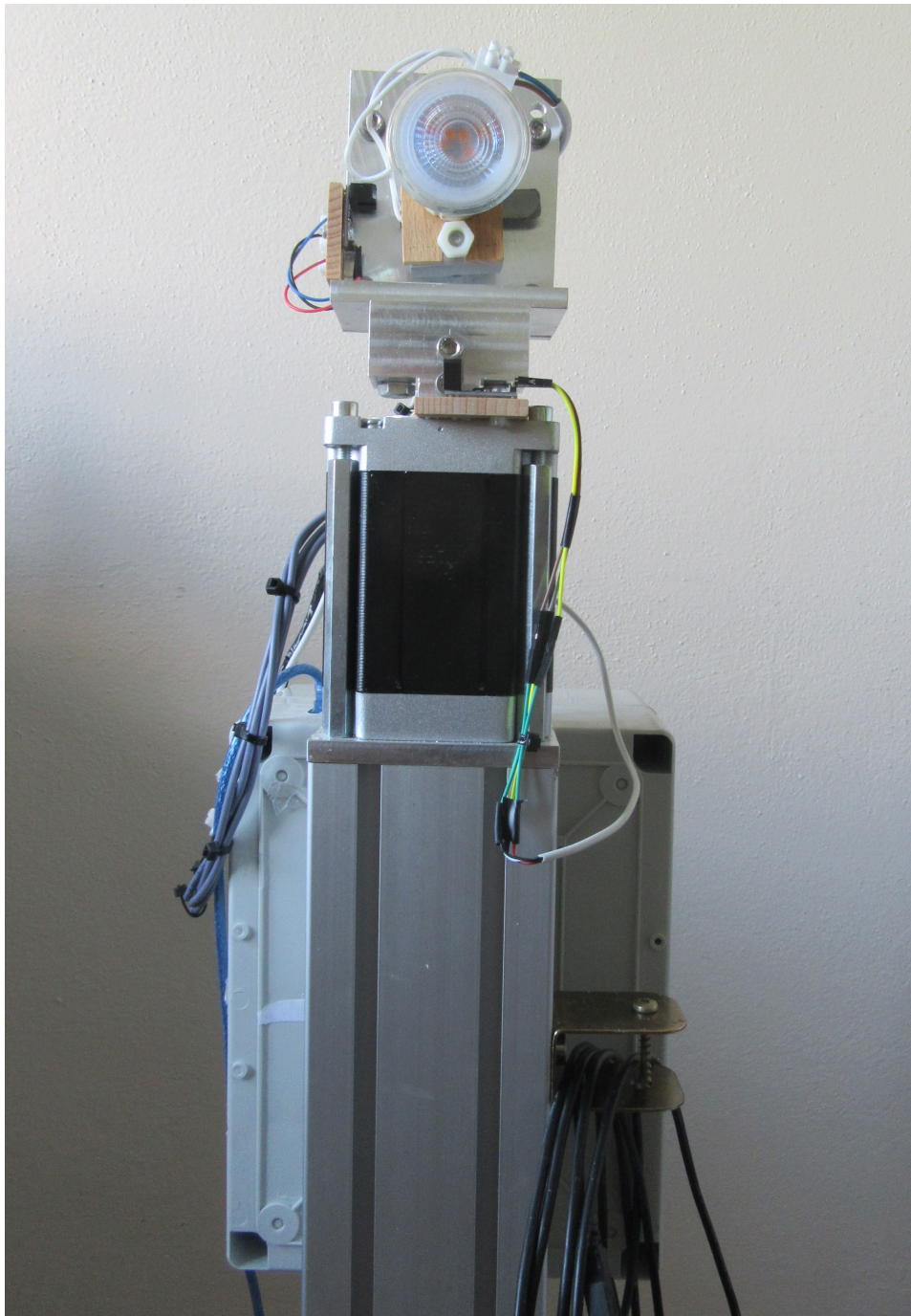


## E Zapojenie senzora TSL2561

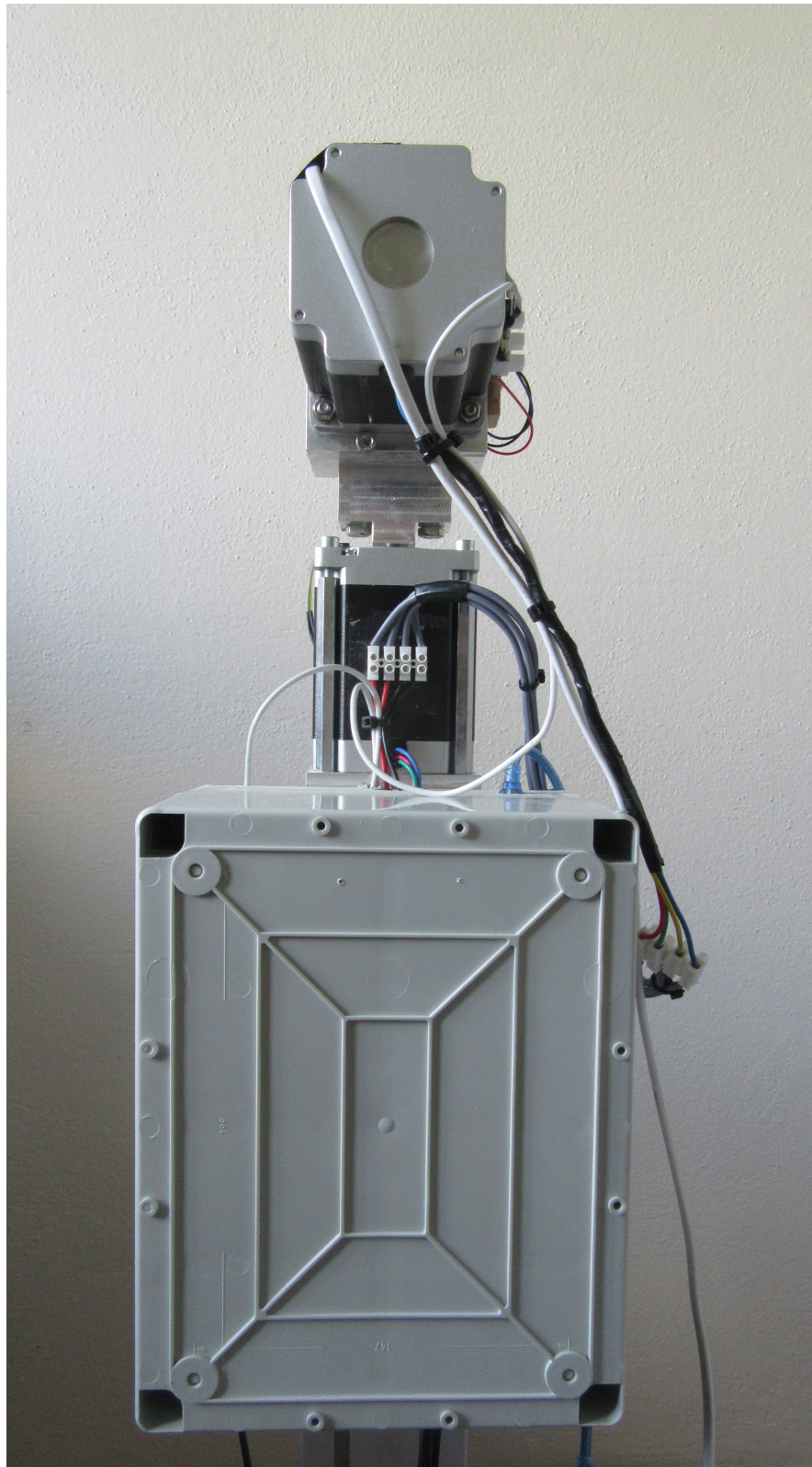




## F Fotky goniofotometra



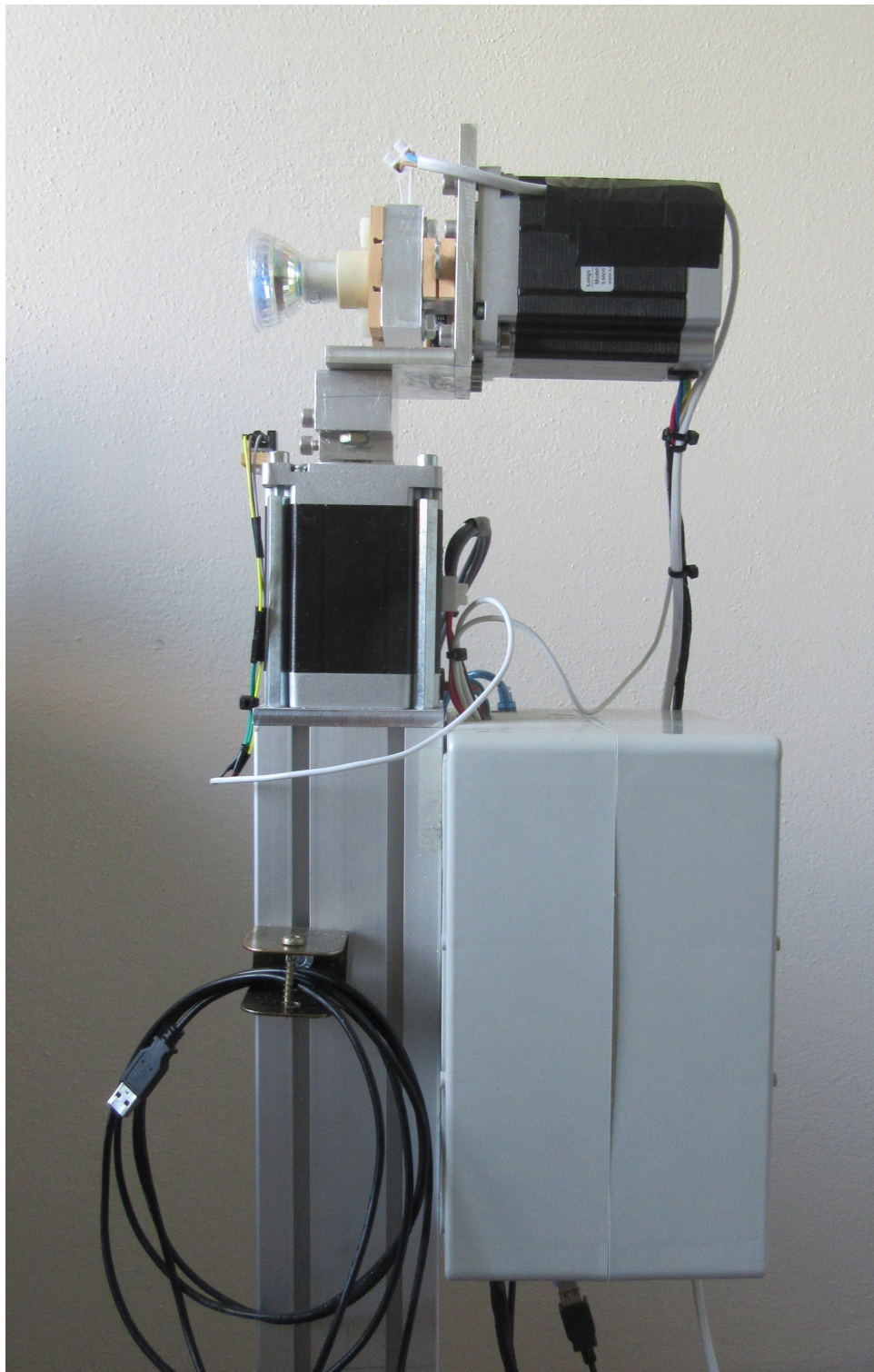












## G Obsah priloženého CD

Na priloženom CD sa nachádzajú zdrojové súbory, obsahujúce programy pre Arduino Uno a program používateľského rozhrania goniofotometra. Ďalej sa tu nachádza zdrojový súbor, ktorý obsahuje všetky podklady (prílohy, textové súbory, obrázky, atď. ...), potrebné na opätovné vygenerovanie textu diplomovej práce, ako aj súbor, ktorý obsahuje časť výsledkov merania, ktoré boli skonštruovaným goniofotometrom namerané.

```
/ ..... koreňový adresár
├── Program-ArduinoUNO ..... zložka s programom pre Arduino Uno
├── Program-Java ..... zložka s programom používateľského rozhrania
├── sablonaPracePdf zložka obsahujúca potrebné podklady (obrázky, textové súbory,
│   prílohy) potrebné na vygenerovanie súboru .pdf
└── Measerement-Results ..... zložka s časťou meraní sv. zdrojov
```